المركز القومي للترجمة

ما البيولوجيا إلا تكنولوجيا

تأليف: روبرت هـ. كارلسون

ترجمة: أيمن توفيق

مراجعة: محمود خيال

2430

المؤلف روبرت كارلسون هو حجة من الحجج الثقات في متابعة التقدم في التقنيات البيولوجية، وهذا الكتاب هو أكثر المقالات استكمالاً فيما يتعلق بالثورة التكنولوجية في البيولوجيا التي من المنتظر أن تتسيد هذا القرن. وهو سياحة ذهنية شاملة في مجال بازغ من مجالات التكنولوجيا هو البيولوجيا. ويبدأ الكتاب بتعريف البيولوجيا وكيفية عمل قطعها وأنها مجرد قطع تنزلق بسهولة ويسر إلى المواقع المحددة لها على غرار قطع لعبة الليجو. ويؤكد على أنها سوف تكون من عُمد الاقتصاد العالمي في المستقبل. وقد تجول المؤلف بين الوقود الحيوي والجائحات العالمية المرضية واللقاحات وتجارة السلع وشئون البترول والغاز.

وتوغل الكتاب في بحث موضوع الوقود الحيوي لأهميته الاقتصادية الحالية والمستقبلية وأفرد له فصلاً خاصاً، مع عقد مقارنة مستفيضة بين تكلفة الوقود الحيوي وتكلفة الوقود الأحفوري (البترول) الحالية. وتطرق إلى الجدل الدائر حول استخدام المحاصيل في صناعة الوقود بدلاً من الطعام. وذكر أن الأمل معقود على أن تحسن التكنولوجيات البيولوجية سوف يلطف من حدة المنافسة بين الطعام والوقود بدلاً من أن تستفحل.

وهو كتاب جدير بأن نقدمه إلى القارئ العربي كي يستشرف نظرة شاملة مستقبلية على التقدم العلمي المتوقع في القرن الحالي.

تصميم الغلاف: هند سمير

ما البيولوجيا إلا تكنولوجيا

المركز القومى للترجمة

تأسس فى أكتوبر ٢٠٠٦ تحت إشراف: جابر عصفور

مدير المركز: أنور مغيث

- العدد: 2430
- ما البيولوجيا إلا تكنولوجيا
- روبرت هـ. كارلسون
- أيمن توفيق
- محمود خيال
- اللغة: الإنجليزية
- الطبعة الأولى 2014

هذه ترجمة كتاب:

BIOLOGY IS TECHNOLOGY:
The Promise, Peril & New Business of Engineering Life
By: Robert H. Carlson

شارع الجبلاية بالأوبرا- الجزيرة- القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤
El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.
E-mail: nctegypt@nctegypt.org Tel: 27354524 Fax: 27354554

ما البيولوجيا إلا تكنولوجيا

تأليف : روبرت هـ. كارلسون

ترجمة : أيمن توفيق

مراجعة : محمود خيال



2014

بطاقة الفهرسة

إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية

إدارة الشئون الفنية

كارلسون، روبرت. هـ

ما البيولوجيا إلا تكنولوجيا/ تأليف: روبرت هـ.كارلسون ؛

ترجمة : أيمن توفيق؛ مراجعة : محمود خيال .

ط ١- القاهرة : المركز القومى للترجمة، ٢٠١٤

٤١٦ ص، ٢٤ سم

١- الأحياء ، علم.

(أ) توفيق، أيمن (مترجم)

(ب) خيال، محمود (مراجع)

(جـ) العنوان ٥٧٤

رقم الإيداع ٢٠١٣/١٠٠١٤

الترقيم الدولى I.S.B.N. 978 - 977 - 718-365-9

طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

المحتويات

كلمة المترجم

هذا الكتاب هو سياحة ذهنية شاملة فى مجال بازغ من مجالات التكنولوجيا هو البيولوجيا. ويبدأ الكتاب بتعريف البيولوجيا وكيفية عمل قطعها، وأنها مجرد قطع تنزلق بسهولة ويسر إلى المواقع المحددة لها على غرار قطع لعبة الليجو. ويؤكد أنها سوف تكون من عُمُدِ الاقتصاد العالمى فى المستقبل. وقد تجوَّل المؤلف بين الوقود الحيوى والجائحات العالمية المرضية واللقاحات وتجارة السلع وشئون البترول والغاز.

ومن قبيل المقارنة وتقريب الأفكار إلى الأذهان، دخل المؤلف فى تفاصيل قصة تطور الطيران الذى يعتبر أنه بدأ كحكاية تُروَى ثم تحولت بالتجريب إلى بيانات ومعطيات رياضياتية، فتحولت من نظريات عن كيفية الطيران (أى نظريات كيفية) إلى نظريات كَمية. ثم يقارن بين معارفنا فى البيولوجيا اليوم، ممثلة فى معلوماتنا عن كائن الخميرة وبين قصة تطور الطيران.

وتوغل الكتاب فى بحث موضوع الوقود الحيوى لأهميته الاقتصادية الحالية والمستقبلية وأفرد لها فصلاً خاصاً، مع عقد مقارنة مستفيضة بين تكلفة الوقود الحيوى وتكلفة الوقود الأحفورى (البترول) الحالية. وتطرق إلى الجدل الدائر حول استخدام المحاصيل فى صناعة الوقود بدلاً من الطعام. وذكر أن الأمل معقود على أن تحسن التكنولوجيات البيولوجية سوف يلطف من حدة المنافسة بين الطعام والوقود بدلاً من أن تستفحل.

ثم دخل فى حديث مسهب حول براءات الاختراع وحقوق الملكية الفكرية، ما لها وما عليها مع ذكر أمثلة تاريخية من تاريخ الطيران، وما حدث فيه وكيف أدت النزاعات

القضائية حول هذه الأمور إلى تأخير التقدم. ولا ننسى أن مارى كيورى عندما اكتشفت مع زوجها بيير كورى مادة الراديوم المشعة، نُصِحت من العديدين بأن تحصل على براءة اختراع وحق احتكار حصرى، وبذلك تحقق ثروة طائلة من بيع حقوق الاستخدام، إلا أنها رفضت ذلك وسارعت بنشر كل تفاصيل اكتشافها فى الدوريات العلمية السيارة مما أعطى دَفعة للأبحاث فى هذا المجال، وأسهم فى تطوير سريع لاستخدامات الراديوم فى المجالات الطبية لعلاج الأورام. ولو كانت فعلت لتأخرت الأبحاث عقوداً. ولست أدرى لِم لم يورد المؤلف هذا المثال الدامغ على أهمية المعلومات المفتوحة المصدر عند حديثه عن هذا الأمر. ويشكل قرار مارى كيورى علامة فارقة فى تاريخ العلم وعلاقته بالاقتصاد.

فى مطلع القرن العشرين لم تكن براءات الاختراع فى مجال السيارات تشمل كل شىء، ولو كان ذلك قد حدث لكنا اليوم نشاهد سيارات تسير بمقود الدراجة بدلاً من عجلة القيادة، ولشاهدنا سيارات لها صندوقان للتروس، بدلاً من صندوق واحد، أحدهما للسير إلى الأمام والآخر للاتجاه إلى الخلف، وهما الصندوقان اللذان نجح هنرى فورد فى جمعهما فى صندوق واحد عندما كان يعمل فى شبابه على جرار زراعى فى منطقة ريفية نائية، ولم يدر بخلده الحصول على براءة اختراع لاختراعه. وبالمثل، لا أدرى لِم لم يورد المؤلف هذا المثال فى معرض حديثه عن براءات الاختراع التى قرر أن الهدف من البراءات هو الصالح العام بالسماح للمبتكرين باحتكارٍ مؤقتٍ على اختراعاتهم، مقابل الكشف عن هذا الاختراع، بحيث يتعلم منه آخرون. غير أن الإفراط فى استغلال هذا الحق بغرض التربح ستكون نتيجته تحجيم الابتكار وتأخير التقدم العلمى.

كما تحدث المؤلف عن الموسيقى وكيف تحولت من موسيقى سماعية إلى موسيقى صحائفية مكتوبة على النوتة، وبذلك نشأت اقتصاداتٌ تتيح تخزين الموسيقى وبيعها والتربح منها، ثم تحولت إلى موسيقى رقمية يسهل تنزيلها من وإلى الإنترنت.

وفى حديثه عن الأوبئة والجائحات العالمية ذكر أننا ربما سوف نحتاج سريعًا إلى الاستعانة باللقاحات المخلَّقة. ولم يفته أن يشدد على أن تطور الفيروسات قد يكون أسرع من التكنولوجيا الحالية لإنتاج اللقاح، واللقاحات التخليقية، بما فيها لقاحات الدنا (DNA)، هى بالفعل موضع مناقشة باعتبارها وسيلة للهروب من هذا الفخ.

أفرد المؤلف فصلاً خاصاً لمسابقة بيولوجية تدور رحاها كل عام، ويشارك فيها طلبة من جامعات العالم المختلفة، حيث تقدم الفرق المشاركة مشاريع بيولوجية شتى تتناول كل شيء من إنتاج الكهرباء من الجراثيم، إلى بناء أدوات هندسية جديدة، إلى لقاحات مخلقة، إلى صنع الدم البشرى بواسطة الجراثيم. وقد أثبتت هذه المسابقة مزايا كلٍّ من التخليق بوصفه تكنولوجيا سريعة الاستجابة، وكذلك الانتشار العريض للتكنولوجيات البيولوجية حول العالم. كما أثبتت الدور المبدع الخلاق الذى يلعبه الشباب فى مجالات جديدة تمام الجدة مثل التقنيات البيولوجية.

ثم تحدث عن المحاصيل المعدلة جينيًا مقررًا أنها سوف تلعب دورًا مهمًا فى زيادة إنتاج الطعام. وتوالى المساحات الزراعية للمحاصيل المعدلة جينيًا النمو بمعدلات بالغة الثبات، ويتم استخدام تلك المحاصيل استخدامات جديدة كل يوم على الرغم من أنها لا تلقى ترحيبًا فى الأسواق الأوربيــة التى لا تزال تتوجس منها ولم تتقبلها تقبلاً حسنًا.

ويقرر المؤلف أن غالبية التقنيات البشرية ليست خطيرة فى حد ذاتها؛ وإنما يجعل البشر من التكنولوجيا شيئًا خطيرًا من خلال النيات والاستخدام. غير أن التكنولوجيا البيولوجية التى تطورها الطبيعة قد تشكل خطورة على البشر دون أى تدخل أو اختراعات من جانبنا، وبواسطة الجهد والبراعة فقط سوف نتمكن من تخفيض أخطار الجوائح العالمية للإنفلونزا وسارس أو الملاريا.

إن الرسالة العريضة التى يحملها هذا الكتاب هى: أن التكنولوجيا البيولوجية فى طريقها إلى إحداث تغيير فى اقتصادنا وتفاعلنا مع الطبيعة بطرق جديدة. وقد خلص

إلى أن كل ما أمكن تطبيقه فى شتى مجالات التكنولوجيا يمكن تطبيقه فى البيولوجيا. وفى الإمكان الاستفادة فى البيولوجيا من كل ما نشأ فى تقنيات أخرى عديدة من أفكار ومبتكرات.

أرجو أن أكون قد وُفقت فى نقل المعانى والأفكار التى ينادى بها المؤلف إلى العربية.

والله الموفق

أيمن توفيق

مصر الجديدة فى يناير ٢٠١٢

شكر وعرفان بالجميل

هذا الكتاب هو ثمرة ما يزيد على عقد من المناقشات والبحث والترحال. ولم يتبلور الجهد سوى من خلال كرم الأصدقاء والزملاء والأسرة وصبرهم.

وقد كُتِبَتْ أول مسودة أثناء ما كنت باحثًا زائرًا فى برنامج تاريخ الأفكار المقارن بجامعة واشنطن؛ وأخص بالشكر جون توز والمرحوم جيم كلوز.

وأنا ممتن بوجه خاص لديانا كارلسون وإريك كارلسون ودرو إندى وساره كِلر وريك وبرينج، والعديد ممن راجعوا المسودات وأبدوا تعليقات ثمينة وسألوا أسئلة دسمة.

ولقد أفادت رحلتى فى الفكر حول دور البيولوجيا فى الاقتصاد فى كل خطوة خطوتها من المحادثات مع زملائى، ستيفن أولدريتش وجيسم نيوكوم من زملاء البحوث الاقتصادية البيولوجية (بيو-إيرا). وكانت رحلاتنا الفكرية فى الوقود الحيوى وجانحات الأوبئة واللقاحات والاتجار فى السلع وشئون البترول والغاز والتمويل الدولى، مدعومة برحلاتنا فى العالم الحقيقى فى أمريكا الشمالية وآسيا وأوربا، مما زودنا بمعارف لا مثيل لها.

وأنا أدين بالشكر لكثيرين غير هؤلاء لمناقشات، سواء كانت قصيرة أم مستفيضة أتاحت لى نقدًا وفكرًا رحبت بهما، منهم درو إندى وستيوارت براند وكفين كيلى وفريمان دايسون وإمرى أكساى وبريان آرثر ورالف باريك وروجر برنت وإين بربوليس وتشارلز كانتور ودنيس كاروزو وجاميه كاسكيو وجوزيف تشاو ونابيير كولينز ودافيد جروال ولورين ها وأندرو هسل وجانيت هوب وريتشارد جفرسون وتوم كاليل وجون كوشفانتز

وتوم نايت وإد لازوسكا وإميلى لفين وبارى لوتز وجون مليجان وأوليفر مورتون أوى وبرناردو بيكسوتو وأرتى راى وبراد سميث وريتشارد يو وستيف وبر، وأخيراً ومن المؤكد أنه ليس آخراً، بن ومارجيت رانكين. وأشكر ناشر الكتاب مايكل فيشر، لصبره طوال سنوات.

روبرت هـ. كارلسون

يعمل مديراً في شركة بيوديزيك

الفصل الأول

ما البيولوجيا؟

البيولوجيا هى تكنولوجيا، وهى أقدم تكنولوجيا. فطوال تاريخ الحياة على الأرض، كانت الكائنات تستغل بعضها بعضًا بطرق معقدة. وفى وقت مبكر من ذلك التاريخ كان أسلاف كلٍّ من النباتات والحيوانات تستميل كائنات كانت تعيش مستقلة لتصبح من المكونات الداخلية فى الخلية، وهى التى تسمى الآن الكلوروبلاست والميتوكوندريا. وهذه النُتف من التكنولوجيا تزود خلاياها المضيفة بالطاقة، وبذلك تدعم غالبية الحياة على ظهر هذا الكوكب.

وهى قصة شائعة: فالنباتات والطحالب والسيانوبكتيريا تستخدم أشعة الشمس لتحويل ثانى أكسيد الكربون إلى أكسجين. كما تعمل هذه الكائنات كطعام للهرم الشاسع من العاشبات (أكلات العشب) واللواحم (أكلات اللحوم)، وكلها تنتج ثانى أكسيد الكربون وغيره من الفضلات التى تستخدمها النباتات كموارد.

ويشكل التفاعل بين الكائنات "اقتصادًا" عالميًا طبيعيًا يحول الموارد من المستوى الجزيئى إلى المستوى المرئى للعين، من بضعة نانومترات (10^{-9}) إلى عديد من الميجامترات (10^{6}). ودائمًا ما اعتمد البشر صراحةً على هذا الاقتصاد البيولوجى للتزود بالطعام والأكسجين وغير ذلك من متطلبات. وإلى عهد قريب كان اقتصادنا الصناعى يعتمد فى المقام الأول على تقنيات غير بيولوجية؛ فقد بُنيت الثورة الصناعية

فى المقام الأول على النار والمعادن والكيمياء. غير أن اقتصادنا يبدو الآن أنه يتغير بسرعة، فقد بدأ يعتمد على كائنات جديدة تعدلت جينوماتها بفضل جهود البشر وابتكاراتهم.

فى ٢٠٠٧ بلغت عائدات الولايات المتحدة من التعديلات الجينية للأنظمة البيولوجية ما يقارب ٢ بالمئة من إجمالى الدخل القومى المحلى. ويشمل هذا الإجمالى كل المنتجات التى نضعها تحت عنوان التكنولوجيا البيولوجية - الأدوية والمحاصيل واللوازم والإنزيمات والوقود (انظر الفصل الحادى عشر). ونقارن تلك الاثنين بالمائة بالنسب المئوية التى أُضيفت سنة ٢٠٠٧ إلى الدخل القومى المحلى من القطاعات الآتية: المناجم ٢ بالمائة؛ البناء والتشييد ٤,١ بالمائة؛ المعلومات والإذاعة ٤,٧ بالمائة؛ كل الصناعات ١١,٧ بالمائة؛ النقل والتخزين ٢,٩ بالمائة؛ التمويل ٢٠,٧ بالمائة؛ كل الأنشطة الحكومية ١٢,٦ بالمائة[١]، (قد يتوقع المرء أن يقل إسهام التمويل فى المستقبل).

وعلى الرغم من أن عائدات التكنولوجيا البيولوجية لا تزال متواضعة بالمقارنة مع القطاعات الأخرى، فإن عائداتها فى نمو بمعدل سريع يبلغ ٢٠ بالمائة سنويًا. ويضاف إلى ذلك أن القطاع غزير الإنتاج. وفى الفترة بين (٢٠٠٠ -٢٠٠٧) نما الاقتصاد الأمريكى بما يقارب ٤ تريليونات دولار، وزادت عائدات التكنولوجيا البيولوجية بنحو ٢٠٠ بليون دولار. وحاليًا يعمل فى شركات التكنولوجيا البيولوجية نحو ٢٥٠,٠٠٠ فرد فى الولايات المتحدة، من مجموع قوة العمالة البالغة ١٥٠ مليونًا[٢]، ومعنى ذلك أن أقل من سُدس بالمائة من قوة العمالة القومية أنتج ما يقرب من ٥ بالمائة من الدخل القومى المحلى فى تلك السنوات السبع. وعلى الرغم من أن التكنولوجيا لا تزال غير تامة النضج مقارنة بقطاعات أخرى من الاقتصاد، فإن التكنولوجيا البيولوجية الحالية تشى بأداء اقتصادى غير متناسب ومثير للإعجاب.

وقد جاء هذا النمو السريع فى عائدات هذا القطاع باعتباره نتيجة لمنتجات جديدة خلقت أسواقًا جديدة، مثل العقاقير والإنزيمات التى تساعد فى إنتاج الوقود. كما جاءت

أيضاً من إزاحة منتجات صُنعت بواسطة طرق صناعية أقدم. ويبدو أن اللدائن الحيوية التي بدأت تدخل الأسواق في ٢٠٠٧ و٢٠٠٨، تحتاج لإنتاجها لطاقة أقل بكثير من مثيلاتها المشتقة من البترول.

غير أن التكنولوجيا البيولوجية، مثل أي تكنولوجيات أخرى، تخضع للحقائق الجامدة للسوق. فقد تفشل منتجات جديدة لأسباب متعددة، من بينها التقييم المفرط في التفاؤل للإمكانات التكنولوجية وفتور المستهلكين. ويضاف إلى ذلك أنه يتعين على التكنولوجيا البيولوجية أن تتنافس مع الطرق البديلة لإنتاج السلع أو الوقود، وهي وسائل قد يكون لها قصب السبق بقرن كامل. كما يتعين على الإنتاج البيولوجي أن يتنافس على المواد الخام مع وجود استخدامات بشرية أخرى لتلك المواد، مثلما هو حادث الآن في تسويق الجيل الأول من الوقود الحيوي المنتج من السكر والذرة والزيوت النباتية. فليس من الغريب أن كثيراً من منتجي الوقود الحيوي محاصرون في الوقت الحالي في الصدام بين الطعام والوقود؛ ومن المحتمل أن تكون للمحاصيل والموارد المستخدمة في تنميتها قيمة بوصفها طعاماً أعلى من قيمتها كوقود.

والنظام الاقتصادي الذي يتحكم اليوم في تلك المنتجات يتكون في المقام الأول من أسواق متشابكة تموج بالأعمال ما بين كبير وصغير. وتتزايد هذه الأسواق في عالميتها، ولا تقل أهمية تدفق المعلومات إليها عن أهمية تدفق السلع المادية. وتدعم التكنولوجيا انتشار تلك الأسواق، والتكنولوجيا هي جوهر العديد من تلك الأسواق. وتسهم التكنولوجيات الجديدة في التوسع في تلك الأسواق أو نشأة أسواق جديدة تمام الجدة. وأنا هنا أستخدم كلمة «سوق» بأوسع معانيها، التي تُعَرِّفُها موسوعة «ويكيبيديا» (حاليًا) بأنها "أي تنوع من أنظمة مختلفة أو مؤسسات أو إجراءات، أو علاقات اجتماعية وبنيات أساسية حيث يتم التنسيق بين الأفراد، ويتم تبادل السلع والخدمات والتي تكون جزءًا من الاقتصاد"[٣]، ولا أعني سوقًا بعينها، ولا بالضرورة «السوق الحرة»، ولا أية معاملات معينة تحكمها أي قواعد أو تحددها عملة بعينها.

وبصورة عامة، وكما سنرى، ليس ثمة من سبب يدعو إلى أن نظن أن زعامة أية دولة فى تطوير التقنيات البيولوجية أو استخدامها سوف يستمر لأمد طويل. ولا أن ثقافة أية دولة أو خبراتها سوف تسيطر على الأمر. فحرية التوصل إلى التقنيات البيولوجية متاحة بالفعل فى كل مكان على الكرة الأرضية. وتستثمر كثير من الدول مبالغ طائلة لبناء إمكانات محلية لأغراض محددة لرفع مستوى الرعاية الصحية والتزود بالوقود والمواد وزيادة ناتج المحاصيل الزراعية.

وتتسارع الآن جهود البحوث، ويساعدها فى ذلك التقدم السريع فى التكنولوجيا التى نستخدمها فى التعامل مع الأنظمة البيولوجية. ويمكن الآن بالفعل تحويل المعلومات الجينية إلى نبضات كهربية ثم إعادتها إلى حالتها الأولى بسهولة غير مسبوقة. وهذه القدرة تتيح إدخال عامل التصميم الرقمى (digital design) فى الهندسة البيولوجية، وهو أمر لم يكن متاحًا من قبل. والأهم من ذلك، كما تؤكدها التغيرات فى التكلفة والإنتاجية التجارية، أن التكنولوجيا التى نستخدمها اليوم فى التعامل مع الأنظمة البيولوجية تنعم بنفس التقدم السريع الذى أنتج حاسبات اليوم وسياراته وطائراته. ويثبت ذلك أن تغيرًا حقيقيًا يحدث الآن فى التقنيات الكامنة فى الاقتصاد البيولوجى المستقبلى.

ولقد بدأ لتوه الإحساس بتأثير التحسن الهائل فى التقنيات البيولوجية. واليوم تتكلف كتابة جين من الجينات من نقطة الصفر خلال بضعة أسابيع بضعة آلاف من الدولارات. وخلال خمس إلى عشر سنوات سوف يكون هذا المبلغ كافيًا لكتابة بُنىً (جمع بنية) أكبر من ذلك بكثير، ربما لكتابة كامل جينوم فيروس جديد تمام الجدة أو جينوم جرثومى. ولقد أصبحت بالفعل مشاريع على هذا النطاق الأوسع مثل تخليق الجينات والجينومات من المشاريع الأكاديمية. وعندما تصبح تلك الأنشطة متاحة على المستوى التجارى، فسوف يكون فى الإمكان استخدام جينوم مُخَلَّقٍ لخلق كائن ينتج الوقود أو لدائن جديدة أو مصل لمكافحة انتشار مرض معدٍ.

وهذا الكتاب هو محاولة لوصف تغيرات التكنولوجيا ذات الآثار الاجتماعية والاقتصادية العميقة. وثمة أجزاء من القصة التى سوف أحكيها أعرفها معرفة جيدة إما لأنى كنت شاهداً على الأحداث لحسن حظى، أو كنت فى موقع يتيح لى المشاركة فيها. وجاءت أجزاء أخرى من القصة لأنى كنت أريد أن أتعلم شيئًا جديداً أثناء محاولاتى تصور صورة مستقبلية. ومن الضرورى أن نخوض فى التفاصيل فى بعض المواضع كى نستطيع تصور تعقيدات الأنظمة البيولوجية والتحديات التى تواجه تصميم تلك الأنظمة، وما تحمله تلك التكنولوجيا بين ثناياها من مزايا للسياسات العامة والأمن والسلامة. ويغض النظر عما يخرج به القارئ من أمور أخرى من الكتاب فإن أهم درس هو أن القصة لم تنته بعدُ. فالبيولوجيا هى تكنولوجيا، ومثلما هى الحال فى التكنولوجيات الأخرى، من المتعذر التنبؤ بالضبط إلى أين ستتجه الأمور. غير أننا على الأقل نستطيع أن نبدأ من نقطة بداية التكنولوجيا.

تخليق الكائنات أمر صعب فى الوقت الحالى

لم يبدأ التناول العملى الصريح بجزيئات الجينومات وتغيير تركيبتها إلا فى منتصف سبعينيات القرن العشرين، وما زلنا فى طور تعلم الأساليب. وغالبية الأنظمة الجينية المعدلة لا تعمل تماماً وفقًا لما هو مخطط لها. وتسير الهندسة البيولوجية كما تُمارَس اليوم بطريقة تشنجية، وأغلب المنتجات الموجودة فى الأسواق تُنتَج بعمليات تهيمن عليها طريقة التجربة والخطأ. ويكمن السبب الرئيسى فى أن عملية تصنيع كائنات جديدة كانت بطيئة فى ظهورها إلا أن فهم الكائنات الطبيعية لا يزال أمراً عسيراً.

تزامنت المراحل الابتدائية للهندسة البيولوجية، التى استغرقت الثلاثين سنة الماضية أو نحواً من ذلك، مع الجهود الرامية إلى التعرف على أساسيات البيولوجيا الجزيئية. وفى هذا الوقت انتقلنا من استكشاف عدد الجينات فى الجينوم البشرى إلى

صناعة أجهزة آلية تقرأ جينومات جرثومية كاملة فى فترة راحة الغداء فى الظهيرة. ولقد كدس العلم ما يكفى من المعارف لتدعيم التغييرات الجينية الأساسية فى الجراثيم والنباتات؛ وأتاحت هذه التغييرات مجالاً واسعًا من منتجات الجيل الأول.

وما كان يعتبر منذ ثلاثة عقود آخر صيحة فى التكنولوجيا قد بات الآن تدريبًا روتينيًا فى المقررات التدريسية فى المعامل الجامعية، وأصبح بالفعل من بين المقررات الدراسية للمدارس الثانوية. وفى الوقت الذى شاعت فيه التحويرات البسيطة فى الكائنات وحيدة الخلية، فمن البدهى أن أقصى ما انتهى إليه العلم قد سار خطوات كبيرة إلى الأمام. واليوم نجد أن الباحثين الأكاديميين والصناعيين على حد سواء يشتغلون على الكائنات متعددة الخلايا، ويتعاملون مع التزايد المصاحب للتعقيدات فى التطور والكيمياء الحيوية.

ورغم ذلك، قد يبدو التقدم بطيئًا، وبخاصة لأولئك الذين تابعوا ثورة المعلومات التكنولوجية. وفى وقت ما كانت الحكومات والشركات الكبرى تهيمن على صناعة الحواسب. واليوم يلعب الوسطاء ومخترقو أنظمة الكمبيوتر القابعون فى جاراجات السيارات أدوارًا محورية فى تطوير تكنولوجيا الحواسب ومنتجاتها سواء فى العتاد (hard-ware) أو البرمجيات (software).

ولهذا نجد ستيوارت براند، مؤسس «كتالوج كل الأرض»، والذى نظم مؤتمرًا لمخترقى الكمبيوتر (computer hackers) سنة ١٩٨٤، والمؤسس المشارك لـ «شبكة كل الأرض الإلكترونية» و«شبكة الأعمال الكونية»، نجده يتساءل: "أين المخترقون الكبار للتكنولوجيا البيولوجية؟"(٤)، ويجيب قائلاً : "سوف يظهرون". فالأدوات اللازمة لفهم الأنظمة الموجودة وبناء أنظمة جديدة تتطور بسرعة. وكما سوف أناقش فى الفصل السادس كيف أن تكاليف قراءة وكتابة جينات وجينومات جديدة تنخفض بمعدل يبلغ النصف كل ثمانية عشر إلى عشرين شهرًا، وتتضاعف إنتاجية القراءة والكتابة بصورة مستقلة بمعدل مماثل. ونحن الآن قد أوشكنا على الخروج من الجزء «البطىء» من

المنحنيات البيانية، والتى أعنى بها أن التكلفة والإنتاجية باتتا تتيحان مكتشفات ومبتكرات هائلة. وبناء على ذلك تتزايد أيضًا إمكانيات الحصول على التكنولوجيا. و«بيولوجيا جاراجات السيارات» موجودة هنا بالفعل؛ وفى الفصل الثانى عشر أشارككم بجزء من خبراتى الخاصة فى فحص إمكانيات الابتكارات فى هذا السياق.

توقعات الجمهور فى تقدم التكنولوجيا البيولوجية

إن المعارف والاختراعات الجديدة التى يزودنا بها العلم قد تستغرق عقوداً عديدة كى تتحول إلى أدوات ومنتجات - أى أشياء يشتريها الناس ويستخدمونها - لها قيمتها أو تترك تأثيراتها على أحوال البشر. ومن الطبيعى أن هذه التأثيرات ليست مفيدة بصورة متجانسة. غير أننا لا نستطيع أن نعرف ما إذا كانت تقنية من التقنيات، فى تقديراتنا، ستكون ذات قيمة أو مفيدة إلا بعد أن نختبرها فى الاستخدام الفعلى. وعلينا أن نفحص التكنولوجيات البيولوجية الجديدة من هذا المنطلق.

والتقنيات البيولوجية معرضة لكلٍّ من التوقعات غير المعقولة والمخاوف غير العقلانية. وعلى الممارسين لها وواضعى سياساتها على حد سواء أن يتعاملوا مع مطالب المواطنين للإسراع فى مضاعفة الفوائد المرجوة منها وتخفيض مضارها تمامًا. ولا يمكن تلبية كل هذه المطالب فى نفس الوقت، وفى أحوال كثيرة قد تكون حصرية بصورة تبادلية فإما هذه وإما تلك. وهذا التوتر يفرز من ثم مناخًا يهدد الابتكار الذى يحتاجه الأمر أشد الاحتياج، كما سأناقش تفصيلاً فى النصف الأخير من هذا الكتاب.

وأحيانًا تلعب المصادفة البحتة دورًا فى الاستجابة الجماهيرية يعادل دور العلم ذاته. فطبيعة العملية العلمية تجعل غالبية النتائج التى تتناولها الصحافة ليست آخر صيحة فى العلم. وهذا يعنى أنه فى الوقت الذى يكون فيه العلم من الناحية المثالية هو

أنباء المستقبل، تكون الصحافة فى حقيقة الأمر تتحدث عن الماضى. فالأبحاث العلمية تُقدَّم للنشر بعد مرور شهور على اكتمال البحث، ثم تمر بمراجعات وتعديلات تحريرية تستهلك مزيداً من الشهور، وأخيراً تظهر مطبوعة بعد مرور شهور أخرى، وطوال ذلك الوقت تتجاوزها الأبحاث الجارية. ومع تسارع التحسينات التكنولوجية وما يترتب عليها من زيادة إمكانات المعامل، فإن كميات أكبر فأكبر من العلم الجديد تنضغط فى الزمن ما بين الاكتشافات ونشر النتائج القديمة.

ولن نستوعب الآمال المعقودة على التكنولوجيا البيولوجية والأخطار المحيطة بها إلا إذا أدركنا أن الكائنات والأجزاء المكونة لها هى مكونات قابلة للتشكيل من قِبَل أنظمة أكبر. وبالعكس، إذا عجزنا عن هذا الإدراك، فإن ذلك سوف يُحَجِّم من قدراتنا على التقييم الصحيح للفرص والأخطار التى تشكلها التغيرات السريعة فى قدرتنا على تعديل الأنظمة البيولوجية.

نحن الآن فى خضم استيعاب الإمكانات التى تم التنبؤ بها منذ ما يربو على خمسين سنة. فاكتشاف علم البللورات الإشعاعى (X-ray crystallography) (*) الرنين المغناطيسى النووى (Nuclear magnetic resonance) فى العقود السابقة على

(*) علم البللورات الإشعاعى (X-ray crystallography) هو وسيلة لتحديد ترتيب الذرات داخل بللورة، وفيه يُطلَق شعاع من أشعة إكس على بللورة فيحدث حيوداً للشعاع أى انحرافه إلى عدة اتجاهات محددة. ويستطيع الشخص الفنى المتخصص أن يخرج بصورة ثلاثية الأبعاد لكثافة الإلكترونات داخل البللورة. ومن تلك الصورة يمكن حساب مواقع الذرات داخل البللورة، والروابط الكيماوية التى تربط بين الذرات داخل الجزىء، وكذلك الخلل الذى يصيب تلك الروابط. ولما كان العديد من المواد تُكَوِّنُ بللورات، مثل الأملاح والمعادن وأشباه الموصلات وكذلك الجزيئات المختلفة من مواد غير عضوية وعضوية وبيولوجية، فقد أصبح علم البللورات الإشعاعى أساسياً فى تطور مجالات علمية شتى. وأخص بالذكر فى المجالات البيولوجية الفيتامينات والأدوية والبروتينات والأحماض النووية مثل الدنا، وأخيراً جميع التفاعلات الكيميائية. (المترجم).

خمسينيات القرن العشرين فتحت نافذة على عالم الجزيئات، وأتاحت إطلالة مباشرة على تركيبات المواد الطبيعية والمخلقة. وفى نفس تلك الفترة الزمنية مهد شرح نظرية المعلومات، والسيبرنتيكا (cybernetics)، والمبادئ الأساسية للحاسبات، المسرح لتعاملنا مع المعلومات اليوم. والبيولوجيا هى اندماج لعالَمين تحدد فيهما تركيبة المادة ومكوناتها محتواها المعلوماتى وقدراتها الحاسوبية. وهذا الوصف يمكن تطبيقه أيضًا على الحاسبات، ولكن البيولوجيا، إضافة إلى ذلك، هى حالة من حالات المادة، قادرة على تعديل ذاتها وانتشارها الذاتى. فليس من الغريب إذن أنه مع تحسن مقدراتنا لقياس الجزيئات والتعامل معها، من جانب، واستخدام تقنيات حاسوبية قوية لفهم سلوكياتها، من جانب آخر، فإن البيولوجيا تجتذب اليوم قدرًا كبيرًا من الاهتمام. ولا تعطينا علوم اليوم وتقنياته إلا لمحة خاطفة عما يخبئه لنا المستقبل، وعلينا أن نفكر بدقة عما ينتظرنا فى نهاية الطريق.

ما الهندسة البيولوجية ؟

إن نشأة أدوات رياضياتية وحاسوبية ومعملية جديدة سوف يسهل بناء أشياء من قطع بيولوجية - أى هندسة أجزاء بيولوجية حقًا - تصل إلى صناعة كائنات وأنظمة بيئية جديدة، كما سنرى فى الفصول القادمة. وتستكشف باقى أجزاء الكتاب كيفية حدوث ذلك. لكن علينا أولاً أن نفهم ما الهندسة البيولوجية.

وتصلح هندسة الطيران بوجه خاص كمثال رائع عندما نتدارس مشروع بناء أنظمة بيولوجية جديدة. ولا يحاول مهندسو الطيران الناجحون أن يبنوا طائرة بها تعقيدات تماثل النسور أو طائر الطنان بل ولا حتى الفراشة؛ فهم ينجحون بأن يبدأوا بتقليص التعقيدات لاستبعاد كل الآليات التى لا يستطيعون فهمها أو استنساخها. وبالمقارنة، تحوى حتى أبسط الخلايا مفاتيح وأزرارًا وأجراسًا وصفافير لا نفهمها فى

الوقت الحالى. ولن يوفق مهندس بيولوجى فى أن يبنى نظامًا جديدًا تمام الجدة إلا لو تخلص من أغلب تعقيداته تاركًا الأساسيات العارية فقط.

ولقد حدث تحول جوهرى فى طيران الأجسام الأثقل من الهواء، بدءًا من نحو ١٨٨٠. ويموج الطيران المبكر بآلات خيالية قد تدخل فى نطاق الأساطير لأنها لم تطر مطلقًا. وغالبيتها فى حقيقة الأمر لم تكن قادرة على أن تترك سطح الأرض. فقد كانت نتاج التخيل والتفاؤل أكثر من العلم الصلب بفيزياء الطيران، أو، وهو الأهم، انعدام الخبرة العملية بالطيران.

وفى نحو ١٨٨٠ اقترح لويس- بيير مويار (Louis-Pierre Mouillard)، وهو فرنسى كان يعيش فى القاهرة، أنه بدلاً من وضع محرك فوق جناحين بأمل أن الهواء سوف يسحبها، فإن البشر لن يحققوا طيرانًا بمحرك إلا بدراسة القواعد العملية للطيران. وهذا هو بالضبط ما جعل الطيران ينجح. ونجح رواد الطيران فى الصعود على متن الهواء من خلال الملاحظة الدقيقة والتدرب. وأعقبت هذه المنجزات عقود من تحسين قواعد التصميمات التجريبية، حلت محلها تدريجيًا نماذج قياسية وتنبؤية للأجنحة والمحركات وأنظمة التحكم. والطائرة الحديثة هى نتيجة لعملية تعلم الطيران هذه.

هكذا تجرى فعليًا كل التقنيات البشرية الأخرى، من السيارات إلى الحاسبات إلى بناء السفن والسدود والكبارى. وقبل بناء أى أشياء من الجماد فى العالم اليوم - يتم بناؤها فعليًا - فتُبنى وتُختَبَرُ باستخدام نماذج رياضياتية معقدة. واليوم تُبْنَى نماذج مماثلة للأنظمة البيولوجية البسيطة، وهذا الجهد يحتاج لجزيئات تعمل بأساليب مفهومة وقابلة للتنبؤ. وأفضل وسيلة لفهم كيف تتغير التكنولوجيا البيولوجية هى بأن نبدأ باستعارة مجازية أخرى، تعتمد على أفضل لعبة أطفال ابتُكِرت فى التاريخ: الليجو.

الفصل الثانى

البناء بأجزاء بيولوجية

البناء بقطع لعبة الليجو، لعبة الأطفال الشائعة، هو تشبيه ممتاز للبناء المستقبلى بقطع البيولوجيا. والسمات المفيدة المشتركة لقطع الليجو وكل ما يشابهها من ألعاب هو أن القطع تتطابق معًا بطرق مفهومة ومحددة. وليس معنى ذلك أنها جامدة وغير مرنة، فبشىء من الخيال يمكن تكوين تركيبات غريبة من قطع الليجو وغيرها من الأنظمة. غير أنه من اليسير أن نرى كيف يمكن أن تنطبق قطعتان معًا بمجرد النظر إليها.

والسبب الرئيسى فى أننا قلقون من الإرهاب البيولوجى والخطأ البيولوجى هو: أن المكونات البيولوجية فى أيدى البشر لم تصبح بعدُ «ليجو». غير أنها ستكون كذلك فى وقت قريب نسبيًا.

كل قطعة لها هدفها

شاع استخدام قطع الليجو وفهمها شيوعًا كبيرًا فى حياتنا حتى إنها تُستخدَم باعتبارها وسيلة إعلان عن منتجات أخرى. وهناك إعلان تليفزيونى رائع عن سيارة لشركة هوندا يبدأ بصورة قطعة من نوع قطع الليجو. وسرعان ما تنضم أعداد لا تحصى من القطع بأشكال وألوان مختلفة إلى القطعة الأولى التى صنعها الحاسب، وكل منها تتجه

إلى المكان المخصص لها بدقة مبهرة. وسريعًا ما تتشكل إطارات المركبة وأرضيتها، تتلوها مقاعد ذكية قابلة للطى، وأخيراً تتشكل الجوانب والسقف. ومن الجلى أن كل أجزاء هذه السيارة المبنية من لبنات بنائية قد تم التفكير فيها وتصميمها وبناؤها بعناية فائقة. وفى نهاية الإعلان يأتى صوت ناعم يجمع كل شيء معًا: "كل قطعة لها هدفها"(١).

والمعنى واضح: لقد صنعت هوندا مركبة جديدة، وكل جزء فيها يؤدى بالضبط الوظيفة المخصصة له. ونستطيع أن نثق بأن كل جزء يفعل ما قُصِد منه تمامًا. وعلى أية حال، تلك هى سيارة حديثة وهى ثمرة من ثمرات التطبيقات الهندسية المعتمدة الحديثة.

وثمة افتراضات غير مُتَحَدَّثٍ عنها فى هذا التعبير عن الهندسة. ومن بين أهمها (١) أن كل الأجزاء هى نتيجة لتصميم هندسى دقيق، (٢) أن الأجزاء يمكن أن تُصنع لكى تؤدى الوظيفة التى حددها لها التصميم، (٣) عندما يتم تجميع هذه الأجزاء، فإن المنتَجَ النهائى يعمل وفقًا لما تنبأ به التصميم الهندسى.

وتسهم انطباعات كل من يشاهد هذا الإعلان فى تداول ونشر هذه الافتراضات غير المتحَدَّثِ عنها. وليس الأمر أننا كمشاهدين لدينا خبرات كبيرة مع منتجات عديدة تمثل هذه العملية الهندسية فحسب، وإنما يستطيع الكثير منا، مع كل أعداد سيارات وشاحنات هوندا على الطريق، أن يتأكد من تلك الثقة فى براعة هندسة هوندا وصناعتها على وجه التحديد.

ومثلما يمكن استغلال الاستيعاب الجماهيرى العام لقطع الليجو فى إضفاء إحساس بالتصميم الهندسى البارع والصناعة الدقيقة لسيارة جديدة من منتجات هوندا، فإن فكرة أن نواتج الهندسة الحديثة آمنة وتتفق مع التوقعات المنتظرة منها، ويمكن استخدامها فى التسويق لتقنيات أخرى.

غير أننا نجد بالمقارنة، لسوء الحظ، أن تقنيات الـ «هندسة» الجينية الحالية مفرطة فى بدائيتها، على شاكلة تبادل عشوائى للمكونات بين السيارات لإنتاج سيارة أفضل. وبصورة عامة، لم تتوفر بعدُ تكنولوجيا بيولوجية فى صورة مشابهة للتكنولوجيات الكهربية والميكانيكية وتكنولوجيا الطيران. وتعتمد المجالات الهندسية المتطورة على وسائل التصميم بالاستعانة بالحاسبات – وهى حزم من البرمجيات مخصصة للأغراض الهندسية المختلفة – مبنية على نماذج قابلة للتنبؤ بنتائج صنعها. وهذه النماذج التنبؤية تُبنَى باستخدام فهم كمى لكيفية عمل أجزاء السيارات والطائرات عندما يتم تجميعها فى عالم الواقع. وعلى النقيض من الغالبية الساحقة من الأنظمة البيولوجية المعدلة، والتى لا تتوفر لها أدواتُ للتصميم، فإن سلوكيات الآلات تامة الصنع أو الدوائر المدمجة يمكن التنبؤ بها من خلال سلوكيات نموذج، وهو الذى يتحدد اليوم على مستوى العالم بواسطة استخدام المحاكاة الكمبيوترية.

والجهود الرامية إلى تصنيع السيارات والإلكترونيات والطائرات المبنية على الحاسب الآلى تدعمها تجارب معيارية ومعدات قياس مثل راسمات الذبذبات (oscilloscopes) ومحللات الشبكات ومقاييس الإجهاد وقياسات الضغط وما إلى ذلك. ويشكل الجمع بين هذه الوسائل مع نماذج قابلة للتنبؤ صندوق أدوات هندسية يتيح تصنيع أشياء مادية. ومما يسهل هذه العملية البنائية وجود حزم لبرامج كمبيوترية تستطيع إرسال تعليمات للأدوات الآلية للتصنيع، وبذلك يتحول التصميم الهندسى إلى منتجات فى وقت قصير نسبيًا. ورغم أن المواد الأولية البيولوجية تختلف اختلافًا كبيرًا عن التروس والمحركات والدوائر الكهربية، فإن البيولوجيا سرعان ما يكون لها صندوق الأدوات الهندسية الخاص بها.

ولقد قطع تطوير الأدوات المناسبة شوطًا كبيرًا بالفعل. وسوف تصبح التقنيات المستخدمة فى قياس الجزيئات والخلايا والتعامل معها من المكونات الأساسية فى صندوق الأدوات. وتدنت أسعار أدوات معملية مثل قياس مُسلْسِلات الدنا (DNA sequencers) ومُخلِّقَاته (synthesizers)، التى تقرأ التعليمات

الوراثية وتكتبها، تدنيًا كبيرًا فى الوقت الذى تزايدت فيه قدراتها زيادات أُسية. وهذه التقنية تتغير بسرعة، بحيث إنها فى خلال سنوات قليلة ستكون قدرات اليوم، المتاحة لحفنة قليلة من معامل الصفوة، الأكاديمية منها والصناعية، متاحة للأفراد العاديين وفى متناول أيديهم.

نحو قدرة على التجميع البيولوجى

هناك طرق متعددة لاستخدام البيولوجيا بوصفها تكنولوجيا. فالاشتغال بالزراعة وتربية الحيوان هى تكنولوجيات رئيسية بالتأكيد. والمعالجة البيولوجية يزداد التوسع فى استخدامها- للتخلص من الفوضى التى تنتج من تقنيات بشرية أخرى - من خلال الاختيار الذكى لنباتات وحيوانات تنمو وتزدهر على مواد تعتبر بصفة عامة من الفضلات. وقد استُخدِمَت الجراثيم لتوليد الكهرباء من مياه المجارى، وكما سوف أوضح تفصيلاً فى الفصل الحادى عشر، يتم استخدام الجراثيم المعدلة جينيًا لإنتاج الوقود[٢]، وتستخدم بالفعل منتجات الأنظمة المعدلة جينيًا فى المنازل والأعمال على مستوى العالم، من إنزيمات مساحيق الغسيل إلى عقاقير جديدة قوية، والتقنية التى تجعل ذلك ممكنًا هى تقنية «الدنا المؤتلف» (recombinant DNA) أو المعاد تجميعه.

ومصطلح «الدنا المؤتلف» مستمد من التقنيات المبكرة للتلاعب فى جينومات الجراثيم. ويكفى أن نقول فى الوقت الحالى، دون التعمق فى التفاصيل، إن الائتلاف، أو إعادة التجميع، هو طريقة بيولوجية قديمة يتم فيها لصق قطعتى دنا نهاياتهما متماثلة فى تركيبتها الكيماوية بواسطة آلية «جزيئية» موجودة مسبقًا فى الخلية. وبعد الفراغ من هذه العملية تصبح «الوصلة» بين النهايتين لا تكاد تُرى. ومن الناحية الكيماوية لا يمكن تفرقة الدنا الناتج من هذا اللصق عن الدنا الأصلى، اللهم فيما عدا أن السلْسَلة الجديدة تشكل شفرة لتعليمات جديدة. ويبدو أن هذه العملية، أو هذه التقنية، قد نشأت فى زمن مبكر من تاريخ الحياة على ظهر هذا الكوكب، كوسيلة لإصلاح جدائل الدنا المكسورة.

وهكذا ترجع السمات التكنولوجية للبيولوجيا إلى الجزيئات التى تكمن وراء الحياة ذاتها. فالأحماض النووية، التى تتجمع فى سلاسل، تشكل المستودع الجزيئى للتعليمات التى يحتاجها بناء أى كائن. والدنا هو بيئة التخزين الأولية لكل الكائنات المكونة من خلايا، فى حين تستطيع الفيروسات استخدام الدنا (deoxyribonucleic acid, DNA) أو الرنا (ribonucleic acid, RNA). وفى الوقت الذى نجد فيه أن الدنا الذى يعمل على بناء كائنات «أعلى» مثل البشر ثابت إلى حد كبير طوال حياة الكائن، نجد أن الجراثيم تستطيع تغيير محتواها من الدنا من خلال تبادل شذرات صغيرة من الدنا، الذى ينتظم فى عناصر مستديرة ومستقرة تسمى البلازميدات (plasmids). والبلازميدات هى فئات تكنولوجية رائعة فى فوائدها، وهى نوع من عبوات معيارية من الدنا، سوف أعود إليها مرارًا وتكرارًا فى هذا الكتاب. ويمكن للبلازميدات أن تعمل باعتبارها وسيطًا لانتقال الجينات المفيدة بين الكائنات، مثل جينات مقاومة المضادات الحيوية، كما يمكنها أن تنتقل إلى الذُرية. ولقد استفاد البشر لعقود طويلة من تلك العبوات التكنولوجية باستخدام صدمة عالية الفولت لفتح مسام مؤقتة فى الجراثيم تستطيع البلازميدات أن تنتقل من خلالها. غير أنه لم يتبين إلا أخيراً أن البشر أعادوا اختراع هذه الخدعة فقط، والتى تعرف باسم «التثقيب الكهربى» (electroporation) وثمة أنواع معينة من الجراثيم التى تعيش فى التربة من المحتمل أنها تحصل على البلازميدات من البيئة بعد أن يضرب البرق ضربته، وهى سمة تتيح للجراثيم أن تتذوق عينات من تنوع الدنا الموجود فى البيئة من حولها وبهذا، إن كانت حسنة الحظ، تختار الجينات التى تراها مفيدة[٣].

غير أن ما هو أكثر تعقيداً من ذلك هو مخططات الاستجابة لأخطار محددة فى البيئة. فجينوم جرثومة فيبريو كوليرى (Vibrio cholerae)، وهى الجرثومة التى تتسبب فى مرض الكوليرا، يملك فى كروموسوماته نوعًا آخر من تكنولوجيا عبوات الدنا، هو "العناصر المدمجة الاقترانية (integrated conjugative elements)، والتى تحوى جينات تتيح مقاومة أنواع بعينها من المضادات الحيوية. والشىء اللافت للنظر فى هذه التقنية

هو أن تبادل تلك «العناصر» بين الجراثيم خامد ومثبط إلا فى حال أن تتهدد الجرثومة بواحد من تلك المضادات الحيوية[٤].

وثمة مزايا تطورية مهمة للجراثيم التى تطور آليات تتيح لها أن تدافع عن نفسها من هجوم بشرى. فقبيل ١٩٩٣، لم تكن تلك «العناصر»، الموجودة فى السلالات الآسيوية لفيبريو كوليرى التى عندها مناعة ضد عقار السيبروفلوكساسين، موجودة فى الطبيعة. والآن نجدها فى كل العينات المأخوذة من ضحايا الكوليرا فى آسيا. وهناك أهمية خاصة (وربما قلق خاص) لهذه الحالة، فالجراثيم قد طورت آلية يحدث بمقتضاها أن وجود السيبروفلوكساسين يشجع على انتشار الجينات التى تحمل شفرات مقاومة المضادات الحيوية، والتى تفسر الانتشار الواسع لجراثيم الكوليرا المقاومة للسيبروفلوكساسين. ويتيح هذا التبادل للمواد الوراثية، رغم أنه ليس أمرًا مقصودًا بأى حال من الأحوال من جانب الجراثيم، يتيح تكوين مجموعة من الأدوات تسمح للجرثومة أن تتكيف مع البيئة وربما تعدل فيها، والتى بدونها قد تكون تلك البيئة قاتلة.

غير أننا نحن البشر فى النهاية، أكثر الكائنات على ظهر الأرض نجاحًا فى استخدام البيولوجيا سواء كأدوات أو مواد خام. ولقد نجحنا، سواء عن قصد أو عن غير قصد، فى التلاعب بأنواع عديدة من النباتات والحيوانات والطحالب والجراثيم لآلاف السنين. وقد تأكد الآن أن البشر زرعوا الذرة منذ تسعة آلاف سنة على الأقل، وانتقوا النباتات التى حدثت بها تغيرات جينية عشوائية جعلتها مفيدة (أو لذيذة الطعم)، وجمعوا تلك الطفرات فى نبات واحد من خلال التربية، ثم العمل على انتشار بذورها[٥]، وعلى الرغم من تلك التعديلات الجينية المعقدة نسبيًا، فإننا من المؤكد متخلفون فى هذا المضمار؛ فقد سبقتنا إليه بكثير غيرنا من الكائنات. ولكن البشر يستفيدون من تنوعات الأنواع أكثر من أى كائن آخر على ظهر الأرض. وقد نتج عن ذلك الاعتماد على تنوع الأنواع تغذية الجسم البشرى ماديًا واجتماعيًا. ومن غير

المحتمل أننا سوف نتوصل إلى بديل لتلك العادة في القريب العاجل حتى لو بحثنا عنها بهمة ونشاط.

كان تكييف كل «التكنولوجيا الموجودة» للبيولوجيا الجزيئية في سبيل الغايات البشرية قد بدأ أول ما بدأ في بواكير سبعينيات القرن العشرين، وسرعان ما استُغلَّت في إنتاج بروتينات على نطاق تجاري. وتسير العملية على النحو التالي: أولاً، تُزرع التعليمات الخاصة بصنع بروتين في خلية بطريق إعادة التجميع. وتأتي هذه التعليمات على صورة جينات، تحتوي تركيبتها الكيماوية على المعلومات الخاصة التي تستخدمها الخلية لبناء بروتينات. وفي الأصل كان الجين المطلوب يعاد تجميعه مع دنا الخلية. واليوم يُحمل الجين أحياناً على فتات مستقل من دنا البلازميد، تعامله الخلية وكأنه خاص بها. وثانياً، يتم تشجيع الخلية على التكاثر في براميل كبيرة في عملية أشبه ما تكون بتخمير الجعة. وفي نقطة معينة في دورة نمو الخلية، يتم تحفيزها على صنع البروتين المطلوب. وأخيراً، تتم تنقية البروتين من الخلايا ويتحول إلى مجرد منتج آخر من منتجات التجارة الحديثة.

وهذه البروتينات المعاد تجميعها، كما يُطلق عليها، تظهر في كل مكان، بما فيها منضدة الصيدلاني. وثمة نوع منه يسمى «إبويتين ألفا» (Epoetin alpha) ويعرف أيضاً باسم إبوجن وبروكريت) وهو بروتين تجميعي يستخدم في زيادة إنتاج كريات الدم الحمراء الحاملة للأكسجين. كما يستخدم مرضى داء السكري في العالم أجمع الإنسولين البشري المُجَمَّع. أما العقار المضاد لالتهاب المفاصل والمسمى «إنبرل» (Enbrel) فهو يعترض مباشرة المسار الجزيئي الذي يسبب الالتهاب. وكل هذه العقاقير مشتقة من تكنولوجيا تجميع البروتينات ويتم إنتاجها بالطرق التي وصفناها.

وتشمل الخطوات التالية في تطور تقنيات البيولوجيا برمجة تجميعات الخلايا كي تقوم بأعمال لافتة للنظر، مثل إنتاج السلع الثمينة. وهو الشيء الذي يحدث بالفعل في حالة يرقات الحشرات، والنباتات، والماعز، والأبقار المعدلة لإنتاج العقاقير والبروتينات

المفيدة فى أنسجتها وألبانها. وسوف تتفتح احتمالات مثيرة للاهتمام عند استيعاب تجمعات الخلايا والسيطرة عليها، بدءًا من شبكات جديدة من خلايا وحيدة إلى كائنات متعددة الخلايا.

وإذا توقفت هنيهة وتأملت فى ذاتك، فسوف تكتشف أننا أنفسنا نشكل أمثلة معقدة لهذا النوع من التكنولوجيا البيولوجية.

فالجسم البشرى يتكون من بين 10^{12}(عشرة بلايين) و10^{14}خلية. ولا يشمل هذا العدد الجراثيم التى تعيش فوق أجسامنا وداخلها، والتى يبلغ عددها ما يقرب من عشرين ضعف عدد خلايانا. وبعض الخلايا البشرية بنيوية، وبعضها يقيس البيئة، وبعضها يحول الطعام إلى مواد مغذية تستخدمها الخلايا الأخرى، والعديد منها يتواصل مع بعضها بعضًا داخل الجسم، وليس ثمة من خلية واحدة تستطيع العيش بدون الأخريات.

ومن خلال هذا التكافل، تتعاون أنظمة الخلايا البشرية فى إنتاج السلوكيات المذهلة من كلام وفن وحب وفضول علمى وتقوى دينية. فإذا ما تلفت أعداد كبيرة من الخلايا أو بدأت فى التدهور بأعداد كبيرة، فإن كل الظواهر المثيرة للاهتمام التى نستطيع قياسها سرعان ما تذوى بدورها. وهكذا يتركب واقعيًا كل نبات وحيوان متعدد الخلايا.

وبداخل الخلايا المكوِّنة للكائنات هناك أنظمة جزيئية بالغة التعقيد تقوم بمعالجة المواد والمعلومات. فتتولى بعض الأنظمة التمثيل الغذائى، وتتعامل لحظة بلحظة مع العمليات الضرورية للحفاظ على الحياة. وتحافظ خلايا أخرى على السلامة البنيوية للخلية أو تنشغل فى تقرير كيفية الاستجابة للمؤثرات الخارجية. وهذه التكنولوجيا الجزيئية المتكاملة تتم السيطرة عليها فى نهاية المطاف فى نواة الخلية، حيث تستقر التعليمات الجينية فى الدنا.

ومن المحتم أن تكون تفاصيل وظائف كل تلك الجزيئات مغلفة بضباب من اللغو المصطلحى. وعلى الرغم من أن العديد من أسماء الجزيئات والعمليات واضحة على نحو مقبول، فإنها كثيراً ما تظهر فى تركيبات معقدة تجعل التفاصيل البسيطة تبدو غامضة. وتجاور المألوف بجوار غير المألوف، بالنسبة لقراء كثيرين، يجعل كل شىء غير مفهوم.

فمثلاً كلمة «نسخ» (transcription) خارج عالم البيولوجيا تستثير أفكار الكتابة أو نقل المعارف من نسق إلى نسق آخر أو من بيئة إلى أخرى. وهذا هو بالضبط ما تعنيه الكلمة فى البيولوجيا. فالمعلومات المخزونة فى الدنا لابد من نقلها إلى بيئة أنسب لآليات الخلية فى التعامل معها وتفعيلها، وهى فى هذه الحالة الرنا المرسال (mRNA). والشفرة الكيماوية فى البيئتين شديدة التشابه، وماكينة النسخ الجزيئى التى تنقل المعلومات من بوليمر(*) إلى آخر هى بوليمريز (polymerase) (شكل ٢-١).

وبالمثل، نجد كلمة «ترجمة» (translation) خارج عالم البيولوجيا تحمل معنى تحويل المعلومات من لغة إلى أخرى. وفى داخل الخلية تشير الكلمة إلى عملية التحويل من شفرة كيماوية للرنا المرسال، المكون من أحماض نووية، إلى الشفرة الكيماوية للبروتينات، المكونة من أحماض أمينية. والآلة الجزيئية المسئولة عن الترجمة هى الريبوسومات.

وكل إنسان يفهم ما المقصود بكلمتى نسخ وترجمة فى سياق الاستخدام الطبيعى فى اللغة الإنجليزية، ولكن أن تضيف دنا ورنا وأحماضاً أمينية وبوليميريزات وريبوسومات إلى جملة فسوف تجد فجأة أن أغلب الناس لا يفقهون. وإنه لوضع نادر الحدوث نجد فيه محاولة لنقل تفاصيل البيولوجيا الجزيئية والكيمياء فى نفس الوقت الذى نحاول أن نحتفظ بانتباه القارئ العادى.

(*) البوليمر مركب يشكل بالتبلمر، وهو اتحاد جزيئين أو أكثر، وتسمى العملية البلمرة أو التمثير. (المترجم).

ويعود سبب هذه الصعوبة بصورة جزئية إلى أن اكتشاف تلك التفاصيل كان أهم قصة فى البيولوجيا فى الجانب الأكبر من العقود الخمسة الماضية. بل كانت تلك التفاصيل هى القصة. غير أن فهمنا الحالى الآن للعديد من تلك الجزيئات قد وصل إلى مرحلة نستطيع فيها أن نصفها مستخدمين اسمًا يتضمن تعميمًا للوظائف. كما أن هذه التعميمات تشير أيضًا إلى إمكانية المزج والمقارنة بين الأجزاء الجزيئية للتوصل إلى الوظيفة المنشودة. وهذه بالضبط هى سمات أجزاء السيارات ومُكوِّنات الحاسبات الآلية التى تسمح بالكثير من الهندسة والتصنيع الحديثين. والوظائف العامة للمحركات والمكربنات والكوابح ومعالجات بنتيوم وسواقات الأسطوانات، كلها مصطلحات شائعة الفهم دون معرفة بتفاصيل هندسة تلك الأجزاء أو صناعتها. ومعنى ذلك أن السيارات والحاسبات هى أنظمة يمكن تركيبها من مُكوِّنات معروفٌ مقدار مساهمتها والمردود منها.

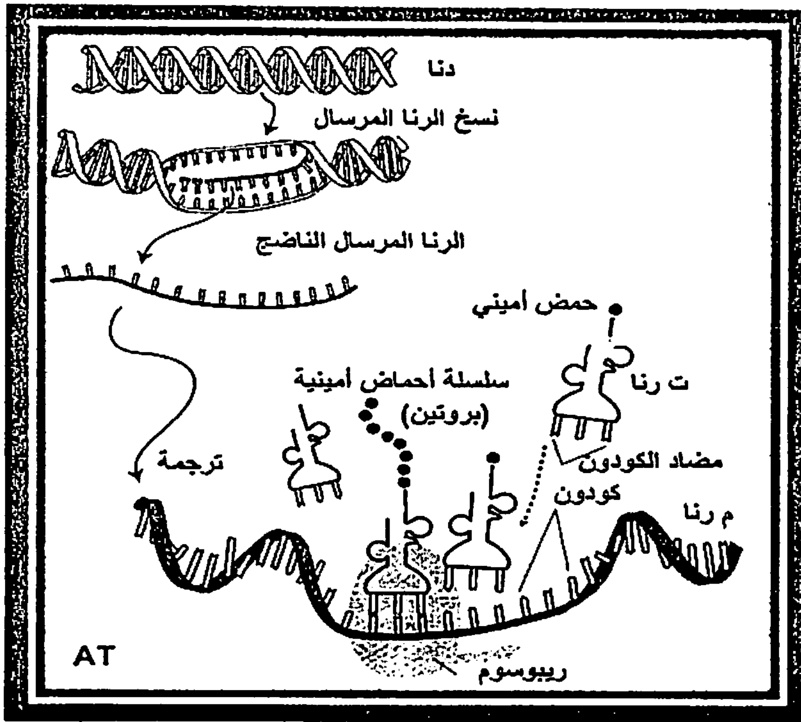
والأنظمة البسيطة القابلة للتجميع مألوفة عند أطفال كثيرين، على صورة كتل بناء، مما يعود بنا إلى لعبة الليجو أو حتى كتل البناء الخشبية. وهى تُستَخدَمُ بصورة حدسية بحيث تكفى صورٌ فى الدليل العملى لوصفٍ تنبؤى للأشياء الحقيقية؛ وتأكد أنك باتباعك تعليمات التجميع المصورة فإن المنتَج النهائى لليجو سيكون مماثلاً لصور الدليل العملى بطريقة مرضية. بل وسوف يؤدى المنتَج نفس الوظائف التى أشارت إليها الصور.

ومع توفر الخبرة ستتكون صورة ذهنية لمنتج جديد لليجو كما تنبأت بها الصور، فأعين الذهن سوف تعمل كمنصة لخلق تركيبات من خلال تجميعات مبتكرة من الأجزاء. ولا يزال متعذرًا حتى الآن، فى الغالبية الساحقة من الأحوال، مزج مكونات بيولوجية بنفس هذه الدرجة من السهولة، لأن سلوكيات كل جزء لا تزال غير محددة تحديدًا كافيًا.

إن الفرق بين القابلية الكاملة للتجميع والواقع الحالى هو ما يحد من بناء أشياء بيولوجية، أى أنظمة جزيئية داخل الخلايا وخارجها، وخلايا مُهَنْدَسَة واقعية، وأنظمة

من خلايا، أو أنظمة بيئية ذات سلوكيات قابلة للتنبؤ بها. ومن البدهى أن ذلك لا يعنى أن مكونات الأنظمة بيولوجية لن يحدث أبداً أن تكون قابلة للتجميع. بل العكس هو الصحيح، فإن الهدف المعلن للعديد من الباحثين على تقابل البيولوجيا مع الهندسة هو خلق أنظمة مُكوِّنات جزيئية قابلة للتجميع تعمل داخل الخلايا كما يُتَنَبؤ لها. والأمل من هذه الجهود يكمن فى الأنظمة البيولوجية الاصطناعية التى سوف تتيح لنا أن ننتج الطعام والكيماويات وما إلى ذلك من مواد خام أرخص وأنظف مما نفعل الآن.

غير أن ثمة شيئًا ينقص تلك الصورة الناصعة للهندسة والتصنيع. بل إن إعلان «سيارة هوندا إلمنت» يفتقد إليها. فكتل وحدات البناء التى تتشكل منها السيارة تتطابق معًا طواعية؛ ولا تتدخل أياد بشرية فى التجميع. ومن الواضح أنه فى عالم الواقع يحتاج الأمر فى الوقت الحالى إلى الأيدى البشرية لجمع الأشياء معًا فى مستويات معينة. وهذه الأيدى تعمل وفقًا لأوامر المخ البشرى (فى أغلب الوقت)، وهذه المخاخ تأتى من شخصيات متباينة، تختلف فى مستوى التفاتها للتفاصيل، وبها كل النواقص التى تصنع منا ما نحن عليه.



شكل (٢-١): من الدنا إلى البروتين. أول خطوة هى تحويل الشفرة الكيميائية للدنا إلى الشفرة الكيميائية للرنا بواسطة بوليميريز (لا يظهر فى الرسم). ثم يُترجم (يتحول) الرنا المرسال «م رنا» (mRNA) إلى بروتين بواسطة الريبوسوم، الذى يقوم بتجميع الأحماض الأمينية إلى بوليمر بمطابقة الرنا الناقل «ن رن» (tRNA) على الشفرة الموجودة على «م رنا». منقولة بتصرف من القاموس الناطق للمصطلحات الجينية، إصدار المعاهد القومية للرعاية الصحية(*).

(*) كودونة (الجمع كودونات) مجموعة من ثلاثة نيوكلوتيدات داخل تركيبة الرنا أو الدنا مسئولة عن تكوين بروتينات معينة. (المترجم).

اعتبارات عملية فى المستوى التقنى

أخذنا العلم إلى النقطة التى نتعلم فيها أن نسيطر على العناصر الجزيئية للحياة وتدفق المعلومات بينها. والتعديلات الجينية هى تغير الوظيفة من خلال استبعاد سَلْسَلَة جينية بعينها فى الإمكان تحديدها، أو إحلال أخرى محلها. وعندما نكتشف جيناً جديداً فى الطبيعة، ويبدو أنه ذو فائدة، فقد نتمكن من توجيهه إلى أهداف جديدة بنقله إلى كائنات غريبة.

وبالفعل يسهم هذا التلاعب بالأنظمة البيولوجية وتحويلها إلى هدف معين فى إيجاد فهم جديد، رغم أن الدروس المستفادة ليست دائمًا سهلة فى التوصل إليها. ويزودنا التاريخ المتقلب للعلاج بالجينات بالعديد من تلك الدروس. فمثلاً، يبدو أن علاجًا ناجحًا لمرض جينى قد تسبب دون قصد فى حدوث سرطان، بسبب أن قاعدة من قواعد التصميم لم تُتبع إلا بعد أن بدأت عملية البناء.

عولج عشرة أطفال فى فرنسا يعانون من مرض مرتبط بكروموسوم إكس، وهو نقص فادح مجمع فى المناعة (X-SCID)، ويسمى أيضًا (مرض الطفل الفقاعة bubble boy disease) – وتم شفاؤهم من هذا المرض باستخدام العلاج الجينى(٦)، وتضمن العلاج التجريبى إضافة نسخة فاعلة من جين أساسى فى أداء الجهاز المناعى لوظائفه إلى جينومات الأطفال المرضى. وأمكن لهؤلاء الأطفال مغادرة المستشفى بعد أن صاروا يحملون خلايا معدلة جينيًا تصنع البروتين المؤثر، وأصبحوا يعيشون حياة تكاد تكون طبيعية. ولسوء الحظ، يبدو فى بعض الحالات أن مرضًا جديدًا قد نشأ نتيجة لنجاح العلاج الجينى؛ فقد أصيب اثنان من هؤلاء الأطفال بعد ذلك بنوع غريب من سرطان الدم (اللوكيميا).

ويشمل علاج مرض (X-SCID) سحب خلايا الدم الجذعية (التى تنتج كريات الدم الحمراء والبيضاء) من نخاع عظام المرضى، ثم تعديل الخلايا جينيًا باستخدام نوع من الفيروسات يسمى «الفيروس المتقهقر» أو «فيروس القَهقَرى» (retrovirus). وتستطيع

الفيروسات المتقهقرة القيام بأعمال مبهرة من إعادة التشكيل البيولوجى. فهى قادرة على إدخال موادها الجينية فى كروموسومات الخلايا التى تصيبها بالعدوى، وبذلك تضمن طول العيش لنوع الفيروسات الذى تنتمى إليه. وكثيراً ما تُستخدَم هذه الأداة الهندسية الطبيعية فى المعامل لإحداث تعديلات جينية فى الخلايا باستبدال الجانب الأكبر من التعليمات الجينية الخاصة بفيروس القهقرى بتتابع مختلف للدنا. وبعد ذلك يتم إدراج هذا التتابع فى جينوم الخلية المضيفة، مما ينتج عنه تغير دائم فى جينومها. وفى حالة علاج مرض (X-SCID) عمل فيروس القهقرى كما هو مخطط له، وأدرج الجين العلاجى فى الخلية الجذعية. وإضافة لذلك، تُدرَجُ عناصر جينية منظِّمة مع الجين الجديد، بحيث تزداد احتمالات إنتاج الخلايا للبروتين الجديد.

وبعد ذلك حُقنت الخلايا المعدلة فى المرضى مرة أخرى، حيث بدأت فى التكاثر كما هو متوقع، ومُزِجت بشدة مع كريات الدم البيضاء الحاملة للجين العلاجى. وبدا أن الجين يؤدى وظيفته بصورة طبيعية منتجًا بروتينًا بمستوى يكفى لإصلاح الجهاز المناعى للمرضى.

ولكن، ولأن فيروس القهقرى هذا يُدْرِجُ الدنا فى موقع عشوائى فى جينوم خلية جذعية، فقد أصبح هناك احتمال ضئيل أن الدنا المدرج قد يؤثر فى جينات أخرى بسبب موقعه الجديد. وثمة تفسير محتمل لظهور سرطان الدم هو أن الدنا المُدرَج قد «هبط» فى موقع حيث تسبب فى زيادة نشاط جين مجاور مرتبط بالسرطان. وأثبتت دراسة حديثة على الفئران استُخدِم فيها الجين العلاجى أن الجين نفسه يمكن أن يسبب سرطان الدم، لأنه يغير مسارات الإشارات التى تؤثر فى نمو كريات الدم البيضاء(٧). وبصرف النظر عن السبب الحقيقى فى الحالات البشرية، كان استبدال مرض يهدد الحياة بمرض آخر يهدد الحياة نتيجة غير متوقعة «للعلاج».

ويبدو امتزاج التحديات الأخلاقية والعملية للموقف جلية وواضحة: فالأطفال المصابون بمرض (X-SCID) نادراً ما يعيشون إلى سن البلوغ، ولكن مع توفر علاج

شافٍ، فإن احتمالات إصابة المرضى بسرطان الدم لا يجب أن تكون جزءًا من الصفقة. ولحسن الحظ أبدى الأطفال استجابة حتى الآن لعلاج سرطان الدم، ومن خلال استخدام تقنيات جديدة يتعين أن تكون هناك سيطرة أفضل على موقع إدراج الجينات فى هذا النوع من العلاج. والأمر برمته يلقى الأضواء على الصعوبات التى نجابهها فى محاولاتنا تعديل الأنظمة البيولوجية التى لم نستكمل فهمها بعدُ.

إلى أى مدى يتعين علينا الذهاب

كانت تجربة (X-SCID) مبنية على قواعد تم فك شفرتها بملاحظة الأنظمة الطبيعية وتعتمد كذلك على المحاولات الميدانية لتعديل برامج السيطرة من خلال العلاج بالجينات. وكشفت التجربة عن قاعدة جديدة فى التصميم الهندسى، وهى أن إدراج جين علاجى يمكن أن يؤدى إلى نشاط غير مقصود فى جينات مجاورة. ولسوء الحظ، وبجانب الاستثناءات الوجيهة التى سوف أتناولها فى فصول قادمة، فإننا نجد أن هذه المقولة بلغة طبيعية قصيرة - أى القصة القصيرة التى تُحكى باستخدام الأجرومية والألفاظ الإنجليزية - كثيرًا ما تكون دقيقة بنفس درجة دقة الأدوات التنبؤية فى البيولوجيا.

والقابلية المحدودة للتنبؤ التى تسمح بها أوصاف اللغة الطبيعية هى عائق واضح للجهود الرامية إلى إعادة هندسة أنظمة معقدة، التى يشكل العلاج الجينى مثالاً لها. والمعضلة الكامنة هى أننا لا نعرف كل قواعد التصميم الهندسى للأنظمة التى تهمنا. ويضاف إلى ذلك أننا نحاول أن نعبر حدوداً لا ترسمها المعرفة فحسب وإنما الخواص الكيفية للمعلومات أيضًا. وهذه الخواص الكيفية ليست بمعنى «الجيد ضد السيئ»، وإنما بمعنى الكيفى ضد النوعى، وما إذا كانت المعلومات يمكن تطبيقها لفهم أوضاع جديدة أم أنها مقتصرة على الوضع الأصلى.

فمثلاً، نجد أن قاعدة التصميم الهندسى باللغة الطبيعية التى اكتُشفت من خلال تجربة (X-SCID) تكفى لتجنب اقتراف نفس الخطأ، ولكنها أقل فائدة فى تجنب حدوث أخطاء جديدة. وهذه الفجوة توضح النقلة بين العلم والتكنولوجيا. والوصف الدقيق لسلوكيات الخلايا غير المعدلة لا يحتاج إلى قاعدة التصميم الجديدة. والوسيلة الوحيدة لاكتشاف تلك القاعدة هى مزيد من التجارب على غير هدى. ولا ريب فى أن التساؤلات عن الكيفية التى يقرر بها العلماء كيف ومتى فهموا ما يكفى لتجربة شىء جديد، وبخاصة إذا كانت أرواح البشر على المحك، هى تساؤلات تصعب الإجابة عنها. والتجربة الجيدة دائماً ما تنتج عنها معارف جديدة. ومع ذلك، هل تكشف هذه المعارف، بمجرد اكتشافها، عن كونها تكفى للمضى قُدُمًا بوصفها معارف كافية أم يتضح أنها غير ناضجة بصورة محزنة؟

ويُختَزَلُ السؤال حتى يصل إلى ما نختاره كتعريف «للفهم». فهل تصلح قصة كُتبت بلغة طبيعية عن الجينات والبروتينات؟ وهل تصلح أداة تصميم بُنيت على نماذج كَمية؟ وكيف يستطيع هذا الفهم أن يعبر عن نفسه فى قدرتنا على التفاعل مع العالم الواقعى؟ وثمة تعريف بأن مقياس الفهم فى البيولوجيا لابد وأن يكون قدرتنا على بناء أنظمة بيولوجية. وهذا يعنى أننا فقط عندما نصبح قادرين على بناء نظام يتصرف من الناحية الكَمية كما هو متوقع له، فإنه سيكون بمقدورنا أن نقرر أننا نفهمه. ويضع هذا التعريف للفهم سداً منيعًا بالغ الارتفاع. ولعله يجب أن يبقى فى الذهن كمجرد وضع مثالى وليس القاعدة المعيارية التى يتوجب الالتزام بها قبل تجربة أية علاجات مبتكرة تحتمل إنقاذًا للحياة. غير أنه يضع المستويات الحالية للفهم فى إطار لافت للنظر لأنه يلقى الأضواء على جهلنا والمخاطر المختلفة التى نواجهها.

وحتى لو قبلنا بمقدرتنا على بناء شيء يصلح «مقياسًا» لفهمنا، فإن ذلك يترك الإحساس بمعنى الكلمة معلقًا فى الهواء. فمثلاً، ثمة انتقاد يوجه إلى هذا القياس لفهمنا هو، أننا قد نتمكن من تقليد الوظائف البيولوجية دون أن نكون قادرين على تعليل

كل ما يحدث؛ ولا يفيدنا هذا القياس فى الإجابة عن السؤال لماذا يكون أى شىء على الوضع الذى هو عليه، سواء فى البيولوجيا أو فى غيرها من الموضوعات.

ومع هذا الفهم المفرط فى ضآلته، ما زلنا نواجه قرار كيفية السير فى تعديل البيولوجيا. وهناك مزايا واضحة لتحسن الهندسة البيولوجية. كما أن هناك أيضًا مخاطر واضحة. فكيف نقرر أننا نعرف ما يكفينا للمخاطرة بالعمل ؟ وهل بإمكاننا أن نعود أدراجنا بعد عبور حد معين؟ وسيكون الاختيار صعبًا بين أن نترك طفلاً يموت بسبب مرض أو نغامر باستخدام تقنية مبتكرة. وماذا لو كان القرار فى هذه الأمور لا يمكن الوصول إليه إلا من خلال التجربة؟ غير أن تلك هى بالضبط نفس الاعتبارات التى تتعلق بكل تطبيق جديد لتكنولوجيا جديدة، من السدود الكهرمائية، إلى المستحضرات الطبية، إلى أغذية الأطفال البديلة عن الألبان، إلى وسائل الأمن والسلامة فى السيارات.

إن الأحجية التى نواجهها ليست نتيجة للتعديلات الجينية الضمنية وإنما هى نتاج السلوكيات البشرية. فالتقنيات البيولوجية فى أيدى البشر متعادلة ومحايدة فى قيمتها- فلا هى بالجيدة أو السيئة فى جوهرها - لأن التكنولوجيا التى يستخدمها البشر عادة ما تكون مستعارة من الطبيعة أو معدلة عنها أكثر من كونها مبتكرة. ونقل الجينات من مكان لآخر لا هو مفيد فى جوهره ولا هو محفوف بالأخطار، ولكن أى تعديل معين فى عالم الطبيعة يتضمن تدخل الأيدى البشرية له أخطاره المحتملة.

والقضية الأهم، هى أننا جميعًا قد اتخذنا بالفعل قرارات لا رجعة فيها. وأنا أرى، كما سوف أناقش فى فصول لاحقة، وأخذًا فى الاعتبار مستوى تطور التكنولوجيا، أننا قد اجتزنا نقطة اللا عودة.. وكذلك أرى أنه ليس من الواضح أننا كان بمقدورنا تجنب أوضاعنا الحالية. وعلى أية حال، ورغم أنه من المثير أن نخمن ماذا كانت ستكون عليها حال العالم إذا كانت القرارات السابقة مختلفة، إلا أنه علينا أن نتعامل مع العالم الذى نعيش فيه اليوم. فقد زودنا الفضول والبراعة البشريان بالمقدرة

على تعديل الأنظمة البيولوجية ولكنها لم تمنحنا بعدُ القدرة على الإدراك السريع للعثرات أو كيفية إصلاح الأخطاء أو ما يفسده المفسدون. وعلينا أن نعالج هذه الهفوات بأسرع ما نستطيع.

والبيولوجيا هى تكنولوجيا صغيرة السن فى أيدى البشر. وبمواجهة تواضع مهاراتنا الحالية والتصرف وفقًا لذلك نستطيع أن نطور توقعات أكثر واقعية لكل من الأوضاع الحاضرة للتكنولوجيا البيولوجية والاحتمالات المثيرة للمستقبل.

الفصل الثالث

تَعَلُّمُ الطيران

(أو الخميرة والإوز وطائرات ٧٤٧)

هناك قول مأثور قديم فى الفيزياء يقول: إن الإوز لا يمكنه الطيران. ولا يزال لغزًا غامضًا حتى اليوم كيف يستطيع الإوز أن يحمل كل تلك الكتلة أثناء الطيران بعيد المدى. ونظن، وفقًا لفهمنا لفيزياء الطيران، أن الإوز لا يمكن أن يكون رشيقًا وفاعلا، على الرغم من الأدلة القاطعة التى تثبت عكس ذلك. والتقديرات عن القوة التى يحتاجها طائرٌ لإبقاء كتلة معينة عالية فى الهواء كانت دائمًا مشوشة إلى حد ما، كما تبينها الاختلافات بين التنبؤات النظرية السابقة والقياسات التجريبية التى نشرتها مجلة «نيتشر» (Nature) سنة ٢٠٠١[١]. وقد اتضح أن الطيور الثقيلة الوزن أشد كفاءة بكثير مما كنا نظن من ناحية التمثيل الغذائى. والدرس المستفاد هو أنه لا يزال أمامنا شوط طويل نقطعه فى سبيل تفسير حتى أبسط الظواهر البيولوجية وما أكثرها. وقد يبدو ذلك متناقضاً مع حقيقة أننا نبنى طائرات تطير لمسافات أطول بكثير وأسرع من الإوز الصياح.

وفى العدد نفسه من مجلة «نيتشر» هناك مقالة أخرى حققت بعض التقدم فى حل جدال مستمر حول ما إذا كانت الطيور تطير فى تشكيلات لأسباب فيزيائية أم لأسباب اجتماعية. وقد تبين أن طيرًا يطير فى تشكيل يستطيع ركوب التيار الهوائى الصاعد الذى خلقه الطائر الذى أمامه مباشرة، مما يتيح له انزلاقًا أفضل ويحتاج إلى ضربات أقل من أجنحته[٢]. وكان قد جرى تنبؤ نظرى سنة ١٩١٤، بأن الطيران فى تشكيلات

مفيد من ناحية الطاقة، ولكن الأمر استغرق خمسًا وثمانين سنة لإجراء القياسات الضرورية. ومع ذلك لا تدعى المقالة إلا اتفاقًا مع النظرية فى الكيف وليس فى الكم. وذلك يعنى أنه يمكن الآن إجراء تجارب بدقة كافية لإثبات أن الطيران فى تشكيلات أمر حسن بصورة عامة للطيور، ولكن التجارب لم تصل بعدُ إلى مستوى جيد يسمح بتأكيدٍ رقمى مفصل للتنبؤات النظرية. وربما يتضح أن النظرية تتوصل إلى نتائج خاطئة ويجب مراجعتها.

والتضارب بين النظرية والتجربة هو من سمات مثل تلك الحكايات التى نرويها حول كيفية عمل البيولوجيا: ومن الأسهل أن نكتب وصفًا كَميًا لنظام بيولوجى من أن نختبر هذا الوصف. والاختلافات الأساسية بين دراسة الأنظمة البيولوجية والأنظمة الفيزيائية الأكثر قابلية لأعمال الهندسة التقليدية يمكن أن نجدها فى حَكى الحكايات. وغالبية نماذج البيولوجيا وتنبؤاتها التجريبية هى حكايات بلغة الطبيعة. وكثيرًا ما نجد فى نماذج وظائف البروتينات اليوم تعبيرات على غرار «البروتين س يتحد مع البروتين ص «أو» البروتين س يتعرف على تسلسل معين للدنا ويشقه». وفى أغلب الأحيان لا نجد أرقامًا. ويفتقر هذا النوع من النماذج إلى القدرات التنبؤية الكَمية، بينما تتطلب الهندسة بوجه عام إطارًا من النماذج الكَمية مبنيًا على تجارب كَمية. ومما لا ريب فيه أن تجارب كَمية قد تمت فى البيولوجيا، وتم بناء نماذج تشرح النتائج، ولكنها كانت تهدف بصفة عامة إلى وصف سلوكيات الجموع وليس الأفراد.

وفى الحق، هناك تاريخ طويل ومثمر من التجارب والنماذج تتناول سلوكيات نظام من الجزيئات أو من الكائنات. وهى دقيقة نسبيًا فى أحوال كثيرة لإجراء توصيفات إحصائية على مستوى الجموع. وهذه الجموع قد تكون مجموعات من الجزيئات، نجحت معها نجاحًا كبيرًا الأدوات الكَمية فى آليات الإحصاء والكيمياء الحيوية، وبخاصة فى شرح الجزيئات العديدة التى تسهم فى السلوكيات الكهربية للخلايا العصبية. كما أن التوصيف الإحصائى يستطيع أيضًا أن يتنبأ بدقة بالطريقة التى تستجيب بها الجراثيم والكائنات وحيدة الخلية للترددات الكيميائية وتسمى «الانتظام

الكيميائى» (chemotaxis) . وبدلاً من ذلك، يمكن التوصل إلى توصيفات إحصائية لمجتمع من الأرانب (فرائس) والثعالب (حيوانات مفترسة). والنمذجة البيئية المستمدة من الكتاب الإبداعى الذى ألفه ماك أرثر وويلسون بعنوان «نظرية الجغرافيا البيولوجية للجزيرة»، هى نمذجة كَمية وتنبؤية فى نفس الوقت[٣]، ووجود نماذج كَمية تنبؤية فى تلك المجالات يتيح قاعدة للهندسة البيوكيميائية وبدايات الهندسة البيئية، على التوالى، وكلاهما تتعامل مع السلوكيات الإحصائية لأعداد كبيرة من الأفراد. غير أنها لا تساعد فى التنبؤ بسلوكيات أفراد من المجموعات ولا بأنواع بعينها من الأنظمة البيئية، سواء منها المعدل جينيًا أو الطبيعى.

وهذا الاختلاف على درجة خاصة من الأهمية عند تناول انتقال مجال البحث من العلم «البحت» إلى التكنولوجيا. فنحن نهتم اهتمامًا فائقًا بكميات المياه التى يستطيع سد معين أن يحجزها، أكثر بكثير من حكايةٍ نوعيةٍ عن كمية المياه التى تستطيع أن تحجزها كومة من الإسمنت المسلح أو ما كميات المياه التى تستطيع السدود احتجازها فى المتوسط. ولهذا، فإن فهمنا المحدود للطيران البيولوجى يفضح بعمقٍ قدرتنا على تنفيذ تكنولوجيا بيولوجية حقيقية. وفى حين تتأكد إمكانية التقدم التكنولوجى المبنى على حكايات اللغة الطبيعية، نجد على النقيض من ذلك أن النماذج الكَمية التنبؤية قد صارت سريعًا من بين أدوات التصميم الهندسى وتتيح لنا هندسة حقيقية.

وتثبت محاولات البشر فى طيران الأشياء الأثقل من الهواء هذه النقطة بجلاء. فالبحوث المبكرة فى مجال الطيران كانت محاولات متباينة يوجهها قدر متماثل من الآراء والملاحظات الشخصية. وفى غياب دعم نظرى، استغرق الأمر سنوات عديدة من الجهد لوضع أسس ثابتة لطيران البشر المعتمد على المحرك. ولكن فى أعقاب إثبات إمكانية الطيران المُسَيْطَرِ عليه مباشرة، أصبح الطيران فرعًا من المعرفة قائمًا بذاته وسرعان ما أحدث تغييرات فى العالم.

ولقد اقترح الفرنسى لويس- بيير مويار (Louis-Pierre Mouillard)، فى كتابه «إمبراطورية الهواء» (L'Empire de l'Air) الذى صدر سنة ١٨٨١، أن الطيران بمحرك ممكن فقط فى حالة تعلم السيطرة على الطائرات بالانزلاق فى الهواء. وميز بين «الطيارين»، وهم من يملكون مهارات تتيح لهم أن يطيروا بالطائرة، وبين «السائقين» الذين كان همهم مركزًا على أن يحلقوا فى الهواء دون أدنى دراية أو قدرات للسيطرة على طائرتهم [٤]، كان مويار سابقًا لعصره حقًا. وفى خطاب أرسله إلى أوكتاف شانوت سنة ١٨٩١، قال عن الألومنيوم "إنه المعدن المناسب للطيران" [٥]. وعلى الرغم من بصيرة مويار الخاصة بالحاجة إلى السيطرة على الطائرة وإلى مواد جديدة، فإنه باعتباره واحدًا من رواد الطيران المبكرين لم يتمكن إلا من القيام بطلعات قصيرة المدى مستخدمًا نموذجًا صغيرًا من الطائرات، ولم يتمكن مطلقًا من إنتاج طائرة تنزلق على الهواء وفاعلة حقًا وتستطيع حمل ركاب [٦].

وتعطينا الطريقة التى تناول بها مويار موضوع الطيران إدراكًا مفيدًا عما سيكون عليه مستقبل التقنيات البيولوجية. فالوسيلة الوحيدة كى نتمكن حقًا من إنتاج أنظمة بيولوجية مُهَندَسة هى أن نتعلم كيف تعمل الأجزاء، وكيف تعمل معًا. ومثلما تعلمنا كيف نطير بطائرة فعلينا أن نتعلم كيف "نطير" بالبيولوجيا.

من الحكايات إلى البيانات...

ظهر الطيران بصورة متفرقة تحت تأثير أكثر الأفكار جنينيةً عن المبادئ العامة للطيران. وفى بعض الأحوال كانت المحاولات الأولى لبناء أجنحة اصطناعية منبنية على الفلسفة بقدر ما هى منبنية على العلم. وقام أوتو ليلنتال (Otto Lilienthal) بأول طيران انزلاقى (شراعى) فى ألمانيا سنة ١٨٩١، وبعد ذلك أمضى سنوات يحاول أن يقوم بقفزات تحت سيطرة مشوشة من فوق تل اصطناعى بالقرب من برلين. وكان من بين أوائل المجربين الذين أدركوا أن المطلوب للطيران هو أجنحة محدبة لا أجنحة مسطحة. كما كان أيضًا من بين أوائل من اتبعوا أفكار مويار عن السيطرة، فطار بطائرته

متنقلاً بوزنه حول مركز الطائرة، متنبئًا بذلك بالطيران الشراعى اليوم. غير أن ليلنثال كانت تسيطر عليه لعنة أفكار إغريقية قديمة تفضل الأشكال الهندسية، مما أدى به إلى أن يفضل جنيحات كانت مقطعًا من دوائر تامة الاستدارة [٧]. ولأول وهلة، قد يبدو تقوس أجنحة الطيور كقطعة من دائرة تامة الاستدارة، ولكن التطور أمضى سنوات عديدة كى يكتشف أن أقواسًا فى شكل القطع المكافئ أفضل شكل للطيران.

وفى الوقت الذى كان فيه ليلنثال يكابد فى سبيل جنيح عديم الكفاءة، وبالتالى تصعب السيطرة عليه، أمضى أوكتاف شانوت (Octave Chanute) الجانب الأكبر من عقد تسعينيات القرن التاسع عشر يجمع معطيات رجحت أن قوسًا فى شكل القطع المكافئ أفضل حقًا. ولعل شانوت قد تعلم هذا الشكل من جون جوزيف مونتجومرى (John Joseph Montgomery)، الذى يُنسَبُ إليه فضل أول استخدام للجناح بشكل القطع المكافئ فى طائرة منزلقة سنة ١٨٨٣[٨]، فعلى مقربة من شواطئ بحيرة ميتشيجان بولاية إنديانا طار مساعدو شانوت والمتعاونون معه بطائرات شراعية منزلقة ذات أجنحة بشكل القطع المكافئ مئات المرات فى أواخر تسعينيات القرن [٩].

كان شانوت سخيًا بما جمع من بيانات. وأعطى ما توصل إليه دون مقابل من خلال المراسلات مع المجربين الرئيسيين فى عصره، ومنها جداول مسهبة عن كفاءة الجنيحات، مما أتاح للمجتمع حصيلة وافرة من المعلومات الخاصة بتصميم الجنيحات [١٠]. وكان الأخوان رايت من بين من تلقوا هذا الكرم، استفادا من حماسة شانوت وتشجيعه وتصميماته للصندوق المقوى الشائع اليوم (ويسمى أيضًا حزام برات[*]) فى تصميم الطائرة ذات الجناحين. وأحسن الأخوان رايت استخدام المعلومات، وأضافا إليها حصيلة ملاحظاتهما المستفيضة ونتائج تجاربهما، وطارا فى أول طائرة شراعية سنة ١٩٠٠. وأعطتهما خبراتهما فى الطيران فى تلك

(*) من أشكال التصاميم الهندسية للكبارى. (المترجم).

الطائرة الشراعية سنة ١٩٠٠ الثقة فى أن يثبتا محركًا فى طائرة ذات تصميم شديد الشبه بالطائرة الشراعية، مما نتج عنه أول طيران بمحرك بواسطة البشر فى ديسمبر ١٩٠٣[١١].

وعلى الرغم من المراسلات المتكررة بين شانوت والأخوان رايت طوال تسعينيات القرن التاسع عشر وبواكير القرن العشرين، فإن شانوت اختلف معهم مؤقتًا أثناء محاولاتهم تسجيل براءة اختراع تكنولوجيا الطيران. فقد رأى أن المعلومات والاختراعات يجب أن تكون متاحة للجمهور العام، وأن الأخوان رايت يعوقان التقدم الأوسع نطاقًا، وأنه يستحق أن يُنسب إليه بعض الفضل فى اختراعاتهما. وشرع الطرفان فى التصالح قبيل وفاة شانوت فى ١٩١٠[١٢].

وبدأ منهاج الملاحظة الدقيقة والتجريب المنهجى الذى بدأه شانوت والأخوان رايت فى التقدم البطىء من خلال البراهين التجاريبية المتعلقة بسريان الهواء فوق الأشكال المختلفة وحولها. غير أنه خلال نشأته، كان الممارسون الأوائل للطيران يعتمدون على حكايات مشتركة، وإن كانت متباينة، منها جداول بيانات شانوت التى تتناول كفاءات الأشكال المختلفة للجنيحات. ولم يحدث إلا بمرور الوقت أن الاستنتاجات باتت معتمدة على معطيات تؤيدها الفيزياء. ونجد على وجه الخصوص أن الفرضية الخاطئة لليلنتال حول شكل الجنيحات أسهمت فى حدوث مشاكل جسيمة فى السيطرة على طائرته، مما أدى إلى حادث سقوط خطير سنة ١٨٩٦، مات فيه ليلنتال من جراء إصاباته. وشخص الأخوان رايت سبب السقوط بعد سنوات عديدة من حدوثه، مما ترتب عليه، جزئيًا، التصميم المبتكر لأدوات السيطرة فى طائراتهما الشراعية[١٣].

فإلى التصميم الهندسى

طوال هذه الفترة المبكرة من الاكتشافات والمخترعات، والعقود التى تلتها، بدأت بشائر نظريةٍ كَميةٍ للطيران تشمل الجنيحات وأنظمة التحكم والمحركات تتجمع ببطء

فى عقول الرياضياتيين والفيزيائيين ومهندسى علم الطيران الذين كانوا فى طور البزوغ. وبهذا تطورت الحكايات الكيفية المبكرة عن شكل الجنيحات وتصميم الأجنحة إلى حشد من المعارف التى حلت محل الأشخاص وغرور الذات، وتقننت فى صورة مصطلحات رياضياتية. وبدورهما تقدم التنظير والتجريب. وأُثبِتَت الفرضيات أو هُدِمت بالتجربة، وتم تفسير التجارب وترشيدها بفرضيات جديدة.

وبنهاية تلك العملية - إن كانت تلك نهاية حقًا- تقدمت هندسة الطيران إلى حدٍّ بلغ فيه الجانب النظرى درجة من الدقة أتاحت للطائرات أن يتم تصميمها على الحاسبات، وتتم تجربتها على الحاسبات، وتُبنى فى الغالب دون تجارب نفق الهواء. وأحيانًا يتم طيران أول بدن طائرة لنموذج جديد بمجرد الفراغ من بنائه. وكانت طائرة بوينج ٧٧٧ أول طائرة يتم بناؤها بهذه الطريقة. وتم تصميمها طبقًا للخبرات المكتسبة من بناء طائرات سابقة وخمسين سنة من الجهود الأكاديمية والصناعية المكثفة التى تجمعت منها خبرات ونظريات وتكنولوجيات مشتركة.

ومن اللافت للنظر أن تطور تكنولوجيا الطيران قد عاد أخيراً إلى المكان الذى بدأ منه وهو المرآب (الجاراج). وكان الهدف من «جائزة إكس»(*)، أن تستثير نفس اختمار الأفكار فى صناعة الطائرات الذى كان موجودًا فى الأيام الأولى للطيران بمحركات، ولقد نجحت فى ذلك نجاحًا مبينًا. وكما أثبت بيرت روتان وفريقه سنة ٢٠٠٣ فى مُجَمَّع سكاليد، فإن بناء طائرة الآن قد بات فى متناول إمكانات الاستثمارات المتواضعة، رغم أنه ليس كل مخترع يملك ٢٥ مليون دولار ينفقها على مشاريع الجاراجات. وعلى الرغم من أن «سفينة الفضاء رقم ١» التى بناها روتان عجزت عن بلوغ مدار أثناء

(*) مؤسسة جائزة إكس هى مؤسسة لا تبغى الربح، تأسست سنة ١٩٩٥، بهدف تنظيم وإدارة مسابقات عامة لتشجيع التطور التكنولوجى المفيد للبشرية. وأشهر جائزة قدمتها المؤسسة كانت جائزة تطوير مركبة فضائية سنة ٢٠٠٤، بهدف تشجيع الأبحاث والاختراعات فى مجال أبحاث الفضاء. (المترجم).

طيراناتها التجريبية، فإنه حتى وقت قريب كان بناء سفينة فضاء فاعلة من أى نوع فوق طاقة أى جهة إلا حكومات قليلة ومؤسسات ضخمة. ولقد تم تصميم « سفينة الفضاء رقم ١ » واختبارها فى المقام الأول فوق منضدة زهيدة التكاليف فى مكتب فى ورشة عمل يدير العمل فيها برنامج حاسوبى تجارى. وعندما ظهرت الحاجة لاختبار مادى، ربط البناة السفينة على ظهر شاحنة وقادوها فى الصحراء بأقصى سرعة. ويعود نجاح المشروع إلى المهارات والخبرات التى أنتجت الطائرة ٧٧٧ مثلما يعود إلى عبقرية روتان باعتباره مصممًا. والتحسن فى الأدوات المادية والفكرية والحاسوبية هو ما حقق النجاح وجعل الأمر ممكنًا.

وثمة احتمال كبير أن تاريخ الطيران، فى تقدمه من حكاياتٍ كيفيةٍ إلى تصميمات مبنية على الحاسب، يكشف عن المسار المستقبلى للتكنولوجيا البيولوجية. ولكن قبل أن تشتد بنا الإثارة حول إمكانات التصميمات البيولوجية العقلانية، من المفيد أن نقارن بين مستوى معارفنا بالبيولوجيا اليوم وبين معلوماتنا فى تكنولوجيا الطيران. ونستطيع أن نتفحص على وجه الخصوص مدى عمق معرفتنا بكائن اعتمدنا عليه لآلاف السنين.

فالخميرة هى كائنات وحيدة الخلية تتيح لنا إنتاج الجعة والخبز والجبن والنبيذ وتعمل كمنصة تصنيعية أولية فى صنع أشياء بيولوجية أخرى. فكيف نقارن معارفنا عن الفتات والقطع التى تصنع الخميرة بمعارفنا عن الأجزاء فى طائرة «حمار شغل» مثل البوينج ٧٤٧؟

يمثل التصميم والبناء الأصلى للطائرة ٧٤٧ تقريبًا نقطة منتصف الرحلة من الأخوان رايت إلى الطائرة ٧٧٧ وتُبنى الطائرة ٧٤٧ من نحو ٥٠,٠٠٠ نوع من القطع، بعضها يتكرر (مثل أدوات الربط)، بحيث يكون مجموع القطع ٦ مليون. وتُبنى الطائرة وفقًا لتكنولوجيا عمرها ٥٠ سنة. وكل جزء، سواء كان دعامة الجناح أم جنيح أو شفرة التوربين، يوصف حسب نموذجه الكمى – أى

«فيزياء الجهاز» (device physics)(*) – التى تتنبأ بسلوكياته فى الظروف المتوقعة أثناء الطيران. وفكرة «فيزياء الجهاز» هى الرسم التمهيدى الموجود فى قلب التجميع البيولوجى (الذى ذكرناه فى الفصل الثانى). وهى فكرة تجريدية تسمح للتصميم باستخدام السمات المهمة فى مُكَوِّنٍ من المكونات ككل بدلاً من التركيز مثلاً على عما تقوم به كل الذرات فى مضخة توربينية أثناء الإقلاع.

كل الأشكال التركيبية فى الطائرة ٧٤٧ هى نتاج خبرات طويلة توفق بين الوزن والأداء وتجعله أقرب ما يكون إلى الكمال، وكل مادة تُختار لكى يُصنع منها كل جزء تُختَبَر بكل دقة فى قوتها وطول عمرها. وتتطابق أوصاف كل جزء فى الطائرة ٧٤٧ فى نموذج أكبر موجود أصلاً فى الرسوم التخطيطية وفى رؤوس مهندسى البوينج. وتم اختبار كل جزء للتأكد من أنه سوف يعمل وفقًا لما حدده له النموذج العام. وكل جزء اتفق مع المواصفات التى حددها التصميم.

فماذا عن الخميرة؟ إذا اقتصرنا فى البداية على المكونات التى وصفها جينومها (البروتينات والرنا)، نجد أن الخميرة بها ما يقرب من ٦٣٠٠ نوع من القطع الجينية وهى مبنية بتكنولوجيا عمرها ثلاثة بلايين سنة. ولدينا نماذج لنحو ٥٠ بالمائة من تلك الأجزاء، وهى نماذج بُنيت بأدنى درجات الوضوح، بمعنى أننا أعطينا كل جزء اسمًا، وأننا نعرف بوجه عام نوع الذرات التى تتكون منها كل قطعة، وقد تكون لدينا فكرة عامة عن وظيفتها. ولا نعرف غالبية مواصفات تصميم القطع (أى ما الغرض منها ولماذا)، ولا نعرف «فيزياء الجهاز» الكَمية إلا لحفنة محدودة منها. وهناك ما بين عشرات النسخ وآلافها من أغلب البروتينات نشيطة فى خلية خميرة فى أى وقت محدد.

وإذا ما أدرجنا معنا الجزيئات التى لا يُوَصِّفُها الجينوم بطريقة مباشرة، فإن قائمة الأجزاء سوف تتضخم بآلاف أخرى منها، مع الجهل إلا بأسماء ووظائف القليل

(*) فيزياء الجهاز أو القطعة أى السمات الفيزيائية الخاصة بالمادة والطاقة والتفاعلات بينهما. (المترجم)

منها. (فى القائمة المحدودة للتوصيف الذى أستخدمه هنا، نجد أن الجينات تشفر بروتينات، فلا يوجد تشفير جينى لتركيبات السكريات ولا الدهنيات، فهذه الجزيئات تبنيها أو تعدلها البروتينات). وهذه الجزيئات تشتمل على الدهنيات والكربوهيدرات المكونة لغشاء الخلية، والمكونات المختلفة للأيض (التمثيل الغذائى). وهذه القائمة تنمو باستمرار، وليست لدينا إلا فكرة مشوشة عن سبب وجود كل هذا العدد من القطع فى الخلية، وما القطع الأخرى التى تتفاعل معها، وتحت أى ظروف. والعدد الإجمالى للقطع المتحركة فى أية خلية من خلايا الخميرة، لا ريب فى أنه يصل إلى ملايين عديدة، وهو عدد لا يزال مجهولاً.

ثمة اختلاف مهم بين تصميم أنظمة بيولوجية وتصميم الطائرات هو؛ أننا فى حالة الطائرات نفضل أن نعمل فى أُطر أداء تَسْهُلُ نمذجتها وفهمها. ومن الجلى أن هناك مجالاً لاحتمالات طيران أشياء تزيد عما يبنيه البشر. ومن الواضح أيضًا أننا لا نفهم فيزياء غالبية الأشياء الموجودة فى الهواء، والبرهان على ذلك هو عجزنا عن تعليل بقاء الإوز عاليًا. غير أننا بقصر جهودنا على أنواع الدفع والأشكال التى تقع فى نطاق إمكاناتنا فى النمذجة، نستطيع أن نؤسس أدوات التصميم على هذه النماذج وبهذا نُكَوِّنُ بنية تحتية لبناء طائرات على شاكلة الطائرة ٧٧٧.

وتعتبر الطائرة ٧٧٧ نقلة متقدمة هائلة من الطائرة ٧٤٧، وهى تُبنى من نحو ١٣٠,٠٠٠ نوع من القطع (تحوى كل طائرة نحو ٤ ملايين مكَوِّن) وتم تصميمها من الصفر كليةً باستخدام 'تصميم يسانده الحاسب' (computer-aided design, CAD) وتضيف المحركات ما يقارب ٥٠,٠٠٠ قطعة، بعضها يتحرك بسرعات تفوق سرعة الصوت. وأثناء مرحلة التصميم تبقى «فيزياء الجهاز» ومواصفات التصميم لكل قطعة داخل نموذج حاسوبى كبير تتم محاكاته بصورة متكررة لكى نستوعب الكيفية المحتملة التى ستعمل بها الطائرة بعد أن يُستكمل تجميعها. ورغم أن القطع المنفردة والأنظمة الجانبية المجمعة، مثل الأبواب، قد اختُبِرت بكل دقة فإنه لم يُستخدم نموذج هندسى بالحجم الطبيعى فى بناء الطائرة[١٤]. فاستُخدِم أول بدن طائرة ٧٧٧ كأساس لاختبار

الطيران. فقد جَمَّعَت بوينج الطائرة من مكوناتها ثم طيرتها مباشرة. وكان ذلك إنجازًا هندسيًا مبهرًا.

ونحن نأتمن هذه العملية على حياتنا كل يوم.

وعلى النقيض من ذلك، نجد أننا لا نملك إلا عددًا ضئيلاً من النماذج الكَمية فى البيولوجيا، كما لا نملك أدوات للتصميم فى البيولوجيا. وعلى الرغم من ندرة مثل تلك الأدوات، فإننا نبادر بالابتكار (بنجاح متفاوت)، ونبنى أنظمة بيولوجية تخليقية بدائية، مدخلين تعديلات جينية إلى البيئة.

ونحن نأتمن هذه العملية على حياتنا كل يوم.

والفارق بين هاتين العمليتين التكنولوجيتين يماثل الفرق بين ثقتنا فى كلتيهما. فالنماذج الرياضياتية لكل الأنظمة الموجودة فى طائرات الركاب النفاثة، وأبدان الطائرات ذاتها، قد تم اختبارها بعناية والثقة بها تامة - وسوف أطلق عليها «النموذج الطيرانى» - بحيث بات الكثير من هبوط الطائرات فى طقس بالغ السوء لا يتضمن تدخلاً بشريًا من أى نوع. وقد أصبحت نماذج أداء الطائرات التى بُنيت أثناء تطورها أساسًا لبرامج الطيار الآلى. ونظرًا للجودة الفائقة لنماذج الطيران اليوم، فإن برامج الطيار الآلى المبنية عليها تستطيع التعامل مع كل الظروف من أمطار وضباب ورياح عاتية. ويكاد يكون كل شخص طار على متن طيارة تجارية فى السنوات القليلة الماضية قد استفاد من تلك القدرات، بما فيها الإقلاع والهبوط[١٥].

ومن الطبيعى أن لب هذه القدرة يكمن فى الإلكترونيات الموجودة على الطائرة، والمعروفة باسم «إلكترونيات الطيران» (avionics). وبالاختصار، فالجمع بين الحاسبات والنماذج الكَمية التنبؤية بسلوكيات الطائرات تنتج عنه تكنولوجيا مبهرة. غير أن ثمة اختلافات حاسمة بين نماذج الطيران، والحسابات الرياضياتية المستخدمة فى محاكاة النموذج، والحاسبات التى تتم عليها تلك المحاكيات. ووجود حاسبات

سريعة فقط لا يُنتجُ تصميمًا فاعلاً وآمنًا لطائرة، كما أن تلك الحاسبات لا تكفى لطيران الطائرة الناتجة.

وفى حين تتناول النماذج التنبؤية سلوك الطائرات تحت تنوع واسع من الظروف، فإن أهم سمة للطيران هى التفاعل بين الطائرة والبيئة. فمثلاً، فى الوقت الذى تُبذَل فيه كل الجهود لإبقاء دوامات الهواء القريبة من الأجنحة وأسطح السيطرة فى أدنى مستوياتها أثناء الطيران الطبيعى، فإن تدفق الهواء على الأسطح أمر بالغ التعقيد بصورة استثنائية ومن الصعوبة بمكان، بصفة عامة، التنبؤ به. والتحول الفجائى للهواء من تيار صفحى أو سلس إلى تيار مضطرب فوق أسطح التحكم يمكن أن يؤثر بشكل كبير على ثبات الطائرة واستقرارها. والدوامات الهوائية هى مثال واضح على وضع تكون فيه الأحداث خارج سيطرة الطيار الآلى - وخارج القدرات التنبؤية لنموذج الطيران- وقد تؤدى إلى نتائج غير متوقعة.

ويمكن حل التناقض بين ما يتوقع الطيار الآلى حدوثه وفقًا لنموذج الطيران وبين ما يحدث فى الواقع فى كل لحظة من خلال قياس دقيق وفائق السرعة لسلوك الطائرة. وتنتج من هذا القياس معلومات يستطيع الطيار الآلى استخدامها لتغيير موقع أسطح السيطرة، وبالتالى يصحح الانحرافات التى تخالف ما يتنبأ به نموذج الطيران.

وفى المقام الأول تستخدم هذه المعلومات الاسترجاعية فى طائرة كبيرة وثابتة مثل ٧٧٧ للتقليل من تأثيرات الظروف البيئية الغامضة. غير أن نماذج الطيران قد باتت الآن على درجة كبيرة من الدقة، بحيث تستطيع الحاسبات أن تقود طائرة مُصَمَّمَة على درجة من عدم الثبات بحيث يتعذر على البشر قيادتها بدون الاستعانة بالأتمتة (التشغيل الآلى). وكانت الطائرة «إكس-٢٩»، وهى طائرة تجريبية بُنيت فى أوائل ثمانينات القرن العشرين، كانت مصممة بحيث تستغل عدم الثبات الناتج من الانحراف الأمامى للأجنحة، وبالتالى كانت قدرتها على المناورة أكبر من أية طائرة أخرى فى أيامها. غير أن السيطرة على طائرة مصممة بطريقة ثورية تحتاج إلى تعديلات بارعة

فى شكل الأجنحة ومتابعة مستمرة لسلوك الطائرة. والبشر ببساطة عاجزون عن استيعاب المعلومات والتعامل بمقتضاها بسرعة تكفى لإبقاء الطائرة فى الهواء.

كانت سرعات الحاسبات فى بواكير ثمانينيات القرن العشرين تكفى بالكاد للتعامل مع مثل تلك المهام، شريطة أن يكون لك اتصال بحسابات بنوك المعلومات فى وكالة ناسا ووزارة الدفاع كى تتمكن من بناء النماذج الأولية. ومن البدهى أن معالجات البيانات تعمل الآن بسرعات أكبر بكثير. ولكن التقدم التكنولوجى الذى يزيد من سرعة الحاسبات لا يغير من التفاعلات الجوهرية بين القياسات والنموذج والحسابات اللازمة لطيران طائرة. ومما لا ريب فيه أن التقدم فى سرعات المعالجات واللوغاريتمات الكامنة فيها والمستخدمة فى محاكاة سلوك نموذج الطيران واستكشافه قد منحت نماذج الطيران الخاصة بالطيران التجارى الحالى إمكانات أكبر من ذى قبل. غير أنه يتعين مع ذلك اختبار التوقعات المتوقعة من النموذج على خلفية العالم الحقيقى، حتى مع حقيقة أن غالبية الطائرات التجارية اليوم تحمل على متنها حاسبات أقوى بكثير مما حملته «إكس-٢٩».

وفى الإمكان تخيل فكرة أنه لو كانت الإمكانات الحاسوبية قد أُتيحت قبل ظهور الطيران، فلربما كانت النظريات والمحاكاة سبقت التجارب وما نتج عنها من غزارة المعطيات حول كفاءة الجنيحات. وتحدث كل حين بصيرة نظرية بحتة فى الفيزياء مثلما حدث مع أينشتاين وابتكاره لنظرية النسبية الخاصة أو تنبؤات بول ديراك بوجود المادة المضادة. ولكن ظهور الطيران البشرى فى مفتتح القرن العشرين، مثل الغالبية العظمى من المشاكل العلمية والتكنولوجية، كان الدافع إليه فشل التجارب ونجاحها، وما يتبع ذلك من الحاجة إلى الشرح والفهم. وفى غالب الظن فإن تطور التكنولوجيا البيولوجية سوف يسير فى نفس المسار، رغم الادعاءات المتحمسة لعكس ذلك.

واليوم تردد كلٌ من الصحافة العامة والعلمية فكرة أن المحاكاة الدقيقة التنبؤية للأنظمة البيولوجية على وشك الظهور، وأن مرد ذلك يعود إلى الحاسبات السريعة. وليست هذه الوعود مجرد جعجعة. فخلفها آمال مخلصة بأن ثمة أفكاراً نظرية هائلة

فى البيولوجيا وراء الأفق. ولا ريب فى أن الحاسبات سوف تلعب دورًا مهمًا فى تطور التكنولوجيا البيولوجية. وكان الحديث مسهبًا عن دورها سواء فى هتك أستار ألغاز بيولوجية أو فى تطوير الهندسة التى ستتلو ذلك. غير أن الإمكانات الحاسوبية فى حد ذاتها ليست كافية لبزوغ فهم جديد. فالحاسبات عظيمة الفائدة عند التعامل مع كميات ضخمة من البيانات، بيد أن البيولوجيا الجزيئية - بخلاف الفيزياء والكيمياء وغالبية العلوم الهندسية - ليس بها إلا النادر من الأفكار النظرية البحتة. ومن المحتمل أن يستمر هذا المنحى حتى تظهر قياسات تجريبية أفضل تساند بناء نماذج تنبؤية وتبزغ تقنيات أحسن لمحاكاة النماذج.

بناء نماذج الأنظمة البيولوجية ومحاكاتها

إن الفوارق بين النموذج والمحاكاة لهو أمر يستحق اهتمامًا أكبر، لأهميته فى بعض التحديات التى ستظهر مستقبلاً. فالنموذج هو تجسيد للمعارف الخاصة بنظام ما، يتكون على سبيل المثال من حكايات نوعية وتوصيفات تجريبية أو معادلات. وفى مجال الفيزياء يتكون «النموذج القياسى» للجسيمات والقوى من معادلات تصف التفاعلات بين الجسيمات، وبيانات تجاربية تضم كتل تلك الجسيمات. ومحاكاة النموذج القياسى هى محاولة لحساب شىء مثير للاهتمام - مثل كمية الإشعاع فى انفجار نووى أو سلوك فوتون وهو ينتشر خلال مادة جديدة - فى سبيل التنبؤ بنتائج تجربة ما. ووتتم محاكاة النموذج القياسى بطرق متعددة للتوصل إلى تنبؤات حول سلوك الجسيمات الرئيسية فى ظل ظروف وترتيبات مختلفة، وكثيرًا ما تُستخدم تلك المحاكيات للتعرف على الظروف التجريبية التى قد تكشف عن جسيمات جديدة. والتقدم فى كل تلك المجالات ضرورى لتقدم الفيزياء أو أى علم من العلوم ، وقد مُنحت جائزة نوبل لبناء أجزاء جديدة فى النموذج القياسى، ولإجراء حسابات تتنبأ بوجود جسيمات أو تربط بين أجزاء النموذج، وللإثبات التجريبى لتنبؤات محددة (وأحيانًا لدحضها). وكثيرًا ما تتحدد الاستفادة من نموذج فى القيام بتنبؤات بنوع المحاكاة

المستخدمة لإجراء الحسابات، ومثلما تقدمت الحاسبات وعلوم الحاسبات، فقد تقدمت كذلك مجالات الظروف التي يمكن محاكاتها باستخدام النموذج القياسي. وإجراء حسابات، أي محاكاة، خاصة بكتلة جسيمات أو نتائج اصطدام نجمي تختلف اختلافًا شاسعًا بين إجرائها بالقلم والورق، وبين استخدام الحاسبات الفائقة القوة (supercomputers). وبهذا فإن القدرة على النجاح في محاكاة الطبيعة تعتمد على الوسيلة المستخدمة في إجراء المحاكاة وعلى تركيبة النموذج ومحتواها.

وفي هذا القسم سوف أركز على ماذا يعني أن نبني ونختبر نماذج للشبكات الكيميوحيوية والجينية. وسوف أتجاهل تمامًا الحقيقة المهمة بأن الاختلافات المكانية والتقسيمية داخل خلية ما تبدو سمة أساسية في التصميم. وفي حين أن فيزياء الانتشار والانتقال داخل الخلية سوف يُدرَسُ بطريقة كمية، فإنه من الصعب بناء نموذج للشبكة دون أن نهتم أيضًا بما يحدث داخل خلية ما وأين يحدث. ومن الجلي أن أدوات التصميم الفعلي للأنظمة البيولوجية سوف تحتاج أن تتضمن كل تلك المعلومات.

إن نموذج طيران الطائرة ٧٤٧، هو توليفة من فيزياءات الجهاز لكل المكونات في الطائرة. وتحدد بنية النموذج العلاقة بين المتغيرات الموجودة في النموذج أكثر من مجرد حشد للحقائق. أما البنية الحالية لغالبية النماذج البيولوجية فتحددها قواعد النحو في اللغة الإنجليزية، لأن النماذج مبنية باستخدام لغة طبيعية، كما وصفناها في بداية هذا الفصل "البروتين س يتحد مع البروتين ص" أو "بروتين هـ متورط في العديد من سرطانات الثدي". وفي المستقبل، ومع تحسن المعلومات الكَمية، سوف تحتوي نماذج الأنظمة البيولوجية على كميات متزايدة من تركيبات جبرية تجعلها أكثر قابلية للمحاكاة الحاسوبية. فمثلاً، "تركيز المركب س ص يتناسب مع كلٍّ من تركيز البروتين س وتركيز البروتين ص"، مما يجعل من اليسير التعبير عنها بمعادلة بسيطة: (س ص) /١ =ك (س) (ص) وثابت التناسب، الذي يطلق عليه مصطلح (ثابت التفكك) الذي يعبر عنه ك يصف درجة الشدة التي يندمج بها البروتين س مع البروتين ص. وكلما قلت قيمة ك كلما كان ذلك يعني أن أغلب المواد المتفاعلة س وص متحدة معًا.

ومن اليسير فهم تفاعل كيماوى وحيد من هذا النوع واستيعابه ذهنيًا، غير أن أبجديةً مليئة ببروتيناتٍ تتفاعل بطرق متعددة تشكل صعوبة هائلة، بسبب وجود «ك» مختلفة فى كل تفاعل. وإنه لأمر بسيط أن تكتب نموذجًا لهذا الحساء الأبجدى، ولكن محاكاته هى أمر آخر. وما يجعل المحاكاة أمرًا صعبًا، فى معظم الحالات فى الوقت الحالى، هو نقص المعلومات الخاصة بثوابت التفكك، وكذلك الجهل بثوابت المعدلات التى تحدد سرعة كل تفاعل.

وفى الأحوال التى تكون فيها المحاكاة الرقمية للتفاعلات الكيماوية ممكنة، فإنها كثيرًا ما تُستخدَمُ لاستكشاف سلوك نموذج بقيم محددة للمتغيرات التى تظهر فى النموذج. فإذا كان ثابت التفكك مجهولاً، فمن الممكن استخدام المحاكاة لاستكشاف ما يحدث للنموذج مع تنوع واسع من قيم محتملة.

وحتى لو كانت كل قِيم الثوابت المهمة معروفة، فإن القدرة على محاكاة نموذج بكفاءة لكى نصل إلى تنبؤات دقيقة تكون بصفة عامة مختلفة عن صياغة النموذج. ويمكن تنفيذ المحاكاة بالورقة والقلم، فى حالة الاقتصار على بروتينات س وص، أو أنها تحتاج إلى حاسب صغير فائق القوة (سوبركمبيوتر) لمحاكاة كل البروتينات وغيرها من الجزيئات المحورية فى جرثومة، وهو جهد تقوم به حاليًا مراكز بحثية عديدة حول العالم.

وتصبح الحدود بين النموذج والمحاكاة غير واضحة المعالم عندما تكون المحاكاة هى الوسيلة الوحيدة لاستكشاف نموذج معين أو عندما تكون التنبؤات من النموذج معتمدة على طريقة المحاكاة المستخدمة، كما يصفها الفصل القادم. وهذه الصعوبات تشكل أساس العديد من جهود المحاكاة فى الفيزياء والكيمياء والهندسة. فمثلاً، إذا حاكينا نموذج الطيران لطائرة ٧٤٧ فى الجو وممتلئة بالركاب، فمن الجلى أن الطيار الآلى لابد وأن يستخدم وسيلة محاكاة تسمح بتنبؤات دقيقة لسلوك الطائرة. ومن حسن الحظ أن كل تلك التفاصيل تتم مراجعتها فى مرحلة تصميم الطائرة، قبل أن نضع أرواح الركاب وديعة فى يد الطيار الآلى. وبالمثل، عندما نعمل على مشاريع فى

مرحلة أقرب إلى الاختراعات منها إلى المُنْتَج، فإن العلماء والمهندسين يبذلون قصارى جهدهم فى التأكد من أن المحاكاة سوف تمثل عالم الواقع بكل إخلاص. ويتم ذلك، مثلما يحدث مع طائرة ٧٤٧ المحلقة فى الجو تحت سيطرة الطيار الآلى، بتكرار مقارنة القياسات مع المحاكاة طوال التجربة. وقبل استخدام المحاكاة فى التنبؤات، يتوجب أن تكون جديرة بالثقة مثلها فى ذلك مثل التجربة. ولن يفيد أن نعتمد على محاكاة لم يتم اختبارها بصورة كافية.

وعلى الرغم من وضوح الحاجة إلى التمييز بين نتائج المحاكاة وسلوك الأشياء فى عالم الواقع، فإن بعض الباحثين يعتبر المحاكيات بمثابة «تجارب». وقد يكون مرد ذلك إلى توقع أن المحاكاة تمثل بدقة ظواهر فى عالم الواقع أو ربما بسبب القدرة على إجراء محاكيات متعددة متزامنة معًا لاستكشاف السلوك فى نطاق واسع من الأحوال.

وفى حين أنه لعله ليس من الجيد أن نطلق على نتائج محاكاة مصطلح «تجربة» فى غالبية الأحوال، إلا أن ثمة أحوالاً فى الحقيقة يكون ذلك فيها أمرًا مقبولاً. ونموذج الطيران هو واحد من تلك الأحوال، فمن الواضح أن محاكاة نموذج طيران ٧٤٧ تنتج عنها تنبؤات بالغة الدقة عن نظامٍ فيزيائى. ويمكن القول: إن محاكاة تفجير سلاح نووى هو أصدق مثال، فلسنوات عديدة صنعت الولايات المتحدة أسلحة نووية جديدة دون أن تختبر التصميمات الجديدة واقعيًا. والبيولوجيا لم تصل بعدُ إلى هذا المستوى. ولا يوجد فى البيولوجيا ما يشبه ولو من بعيد نموذج طيران.

ولا ريب فى أن الكيميائيين الحيويين قد حققوا نجاحات هائلة فى شرح تفاعلات كيميائية بطريقة كَمية مستخدمين فى ذلك أنظمة بيولوجية. وتمتلئ المراجع بأمثلة من هذا القبيل[١٦]. وقد فُحِصت بالتجارب النظريات الأساسية لأغلب تفاعلات الكيمياء الحيوية بمنتهى الدقة، وليس ثمة من سبب يدعونا إلى اعتبارها مخطئة (رغم أنه قد تكون، بداهةً، غير كاملة). ولكن فى حين أن النظريات تزودنا بالأساس الذى نستطيع بواسطته أن نصف سلوك الجزيئات، إلا أن بها درجة كبيرة من التفاوت. وبدون

قياسات بالغة الدقة لخواص الجزيئات، يكون من العسير أن نعتمد على أوصاف السلوك العام الذى تتيحه لنا النظريات ونخرج منها بتنبؤات كَمية؛ وبدون أن نعرف «ثابتِ التفكك» فمن المستحيل أن نتنبأ بتركيز س وص. وما من سبيل لإضافة أرقام إلى تنبؤات اللغة الطبيعية إلا إذا علمنا درجة الشدة التى يتحد بها بروتين مع بروتين آخر مثلاً، أو المعدل الذى به يتفاعل إنزيم مع المادة الخاضعة له. وغياب هذه المعطيات هو من أكبر العوائق التى تحول دون الفهم العميق للأنظمة البيولوجية.

فعلى سبيل المثال، نجد أن التنبؤ بتأثير عقار جديد على الأيض (التمثيل الغذائى) البشرى يشكل قفزة كبيرة فى تطور العقاقير والرعاية الصحية. ومن المحتمل أن وجود نموذج تنبؤى خاص بالأيض يسهم فى تجنب أخطار جانبية خطيرة لا يتم اكتشافها حاليًا إلا من خلال التجربة والخطأ. ونجد، لسوء الحظ، أن المعلومات الحالية لا تكفى بصورة عامة لإجراء مثل تلك المحاكاة. وفى حين أمكن التقييم الكَمى لعدد صغير من تفاعلات معينة فى الأيض البشرى إلا أن الغالبية الساحقة لا تزال مبهمة، ولا نزال نعتمد على نماذج اللغة الطبيعية كى نفهمها. واليوم، نجد أن أفضل ملخصات للشبكات الأيضية هى خرائط تحوى أسماء جزيئات وأسهمًا تشير إلى التفاعلات[١٧]، ولا تحوى الخرائط أى أرقام وهى بالتالى تعتبر أوصافًا غير كاملة للظواهر. والمعلومات الكَمية ليست أساسية لفهم التفاعلات الفردية فحسب وإنما هى ضرورية بالقطع فى سبيل فهم شبكات التفاعلات مثل تلك التى يتشكل منها الأيض. وكما سنرى مثالاً واقعيًا فى الفصل التالى، فإنه حتى فى حالة شبكة مبسطة نجد أنها تشهد بسلوك كيفى مختلف – مثل أن نجد ذبذبات بدلاً من وضع ساكن – يعتمد على السمات الكَمية لمكوناته الجزيئية، مثل «ثابت التفكك» وثوابت المعدلات وأعمار الجزيئات. ولا ريب فى أنه من المستطاع استكشاف أساليب السلوك المختلفة بمحاكاة نماذج شبكات التفاعلات ثم التخمينات حول العوامل المجهولة. غير أن تلك المحاكيات كثيرًا ما تظهر سلوكًا يختلف من الناحية النوعية عما يلاحظ فى التجارب، كاشفًا أن النماذج لا تحوى تفاصيل كافية متعلقة بالأنظمة الحقيقية.

والبديل للصراع الكامن فى بناء نماذج للأنظمة البيولوجية المعقدة الموجودة هو اختيار أنظمة تسهل نمذجتها. وهذا مبدأ عام فى الصناعات التى يتولاها البشر من صناعة السيارات إلى الحاسبات. وفى غالبية التجارب البشرية فى الطيران، على سبيل المثال، لم نحاول بناء طائرات تطير مثل الحشرات أو الطيور. غير أن القياسات والنمذجة والحسابات الآن قد تحسنت إلى درجة أن المبادئ التى يمكن التكهن بها من دراسة الحشرات باتت تُستخدم فى تصميم طائرات روبوتية صغيرة. وعلى غرار أن نبنى آلات طائرة تعمل فى نطاق قدراتنا على صنع نماذج لها، نستطيع أن نبدأ ببناء أنظمة بيولوجية تخليقية تعمل فى نطاق قدراتنا على صنع نماذج لها، مستخدمين فى ذلك مواصفات تصميمية مبنية على الأجزاء القليلة التى لها فيزياء أداة معروفة. وقد أنتج هذا التوجه السيارة التى نقودها، والحاسب الموجود على سطح مكتبك، وربما آخر صيحة من أحذية «نايكه أو أديداس» التى تنتعلها فى قدميك. ويتناول الفصل القادم الجهود الحالية لبناء أنظمة بيولوجية «وفقًا لمواصفات»، مع أمثلة اختيرت لإعطاء إحساس بالكيفية التى أصبحت بها البيولوجيا كَمية والتحديات التى يتعين التغلب عليها فى الطريق إلى ذلك.

الفصل الرابع

الجيء الثانى للبيولوجيا الاصطناعية (التخليقية)

"لا بد أن أخبركم بأنى أستطيع أن أُحَضِّر مادة البولينا (اليوريا: urea) دون الحاجة إلى كِلية حيوان سواء أكانت كلية إنسان أم كلب"(١). بهذه الكلمات ادعى فردريك فوهلر (Friedrich Wöler) سنة ١٨٢٨، أنه قد أحدث تغييراً فى العالم لا رجعة فيه. وفى خطاب أرسله إلى أستاذه السابق جونز جاكوب برزيليوس (Joens Jacob Berzelius)، ذكر فوهلر أنه قد شهد "أفدح مأساة فى العلم، وهى قتل فرضية جميلة بحقيقة قبيحة". والفكرة الجميلة التى يشير إليها هى «المذهب الحيوى» : vitalism»، والذى يفيد بأن المادة العضوية، وتمثلها اليوريا فى هذه الحالة، تخلقها قوة حيوية، وأن من المستحيل تصنيعها من مكونات غير عضوية. والحقيقة القبيحة هى تَكَوُّنُ طبق صغير من بللورات اليوريا على منضدة معمله بواسطة تسخين أملاح غير عضوية. وبهذا، كما تقرر كتب مرجعية عديدة، وُلِد علم الكيمياء الحيوية التخليقية.

غير أن الأحداث، كما هى الحال كثيراً، كانت أشد تعقيداً مما ذكرته حكايات الكتب المرجعية. فقد استخدم فوهلر أملاحًا حَضَّرها من مخلفات المدابغ، التى ادعى أنصار المذهب الحيوى أنها لوثت تفاعله بمُكَوِّنٍ عضوى(٢)، واستغرق إنجاز فوهلر سنين عديدة كى يتغلغل فى العقلية السائدة يومها، ومضى عقدان من الزمان قبل أن يستخدم واحد من تلاميذه، هو هرمان كولب (Herman Kolbe) لأول مرة كلمة «تخليق»

فى بحث ليصف به مجموعة من التفاعلات التى أنتجت حامض الخليك من عناصره غير العضوية[٣].

وفى بواكير القرن التاسع عشر شاركت الكيمياء فى الثورة التى شملت باقى أنحاء العالم الغربى. وكانت دراسة التحولات الكيميائية، التى كان يُطلق عليها الخيمياء (Alchemy)[*]، تمر بمرحلة من التحديد الكمى للمواد. وبدلاً من الاعتماد على تعبيرات مبهمة وغامضة، أراد العلماء من أمثال أنتوان لافوازييه (Antoine Lavoisier) أن يبتكروا فى الكيمياء ما يشير إليه المؤرخون أحياناً باسم «المفردات الموضوعية». وبواسطة قياسات دقيقة أجراها العديد من الأشخاص بزغت تدريجياً قواعد واضحة لتخليق مواد غير عضوية وغير حية.

وعلى النقيض من ذلك، كانت دراسة الجزيئات العضوية فى بواكير القرن التاسع عشر مهتمة فى المقام الأول بفهم كيف ترتبط معًا الجزيئات الموجودة فعلاً. فكانت الدراسات دراسة للتركيبات والتفاعلات الكيميائية. وخلافًا للمجال الأوسع للكيمياء الذى تشكل من الخيمياء، كان ثمة اهتمام أقل بتخليق مواد عضوية لأن العديد من العلماء ظنوا أن الجزيئات العضوية لا يمكن تخليقها. ثم حدث سنة ١٨٢١ أن فوهلر صنَّعَ اليوريا. وخلال العقود التالية، غيرت القدرات المتنامية على تجميع جزيئات عضوية من مكونات غير عضوية من الطريقة التى كان الناس ينظرون بها إلى العالم الطبيعى، لأنهم صاروا مستوعبين لفكرة إمكانية تجميع أشياء معقدة من قطع أكثر بساطة. وبناء شىء من العدم أو تعديل نظام موجود يستلزم فهم تفاصيل عن النظام أكثر مما يحتاجه مجرد وصف كيفية عمله. وأسهم هذا التوجه الجديد للكيمياء فى فتح الأبواب على العالم الذى نعيش فيه اليوم. فقد هيمنت المنتجات التخليقية للكيمياء

(*) الخيمياء هى اعتقاد الفلاسفة الأقدمين بوجود ما أطلقوا عليه اسم «حجر الفلاسفة» الذى يستطيع تحويل المعادن الفقيرة إلى معادن نفيسة (الذهب والفضة)، وكذلك إيمانهم بوجود «إكسير الحياة» الذى يعيد الشباب ويمنح الخلود. وتعتبر الخيمياء النموذج البدائى لعلم الكيمياء الحديثة. (المترجم)

العضوية على بيئتنا الصناعية، ولم يصبح تصميم هذه المنتجات ممكنًا إلا لأن فهم عملية تجميع الجزيئات قد أفرز قواعد جديدة.

وغيرت خطوة تقنين الكيمياء التخليقية، وبعدها الهندسة الكيميائية بصورة ثورية الكيفية التى فهم بها الناس الكيمياء. وتعلم الكيميائيون من خلال البناء قواعد لم تكن واضحة من قبل. وبنفس الطريقة التى غيرت بها الهندسة الكيميائية من فهمنا للطبيعة، وفى أثناء شروعنا فى هندسة الأنظمة البيولوجية، سوف نتعلم الكثير عن الطريقة التى تعمل بها الأجزاء البيولوجية معًا. وستظهر التحديات غير الواضحة الآن من ملاحظاتنا للأنظمة العاملة المتكاملة والموجودة أصلاً. وبمرور الوقت، سوف نفهم تلك التحديات ونتعامل معها، وسوف يتغير استخدامنا للبيولوجيا أثناء ذلك بصورة مثيرة. والتشابه واضح فى هذه النقطة: وهو أننا على أعتاب تطوير البيولوجيا التخليقية.

ومن الجدير بالذكر، وقبل أن نتعمق فى صلب الموضوع، أن عبارة «البيولوجيا التخليقية» قد استُخدِمت من قبل. وأول مرة استُخدمت فيها هذه العبارة كانت إخفاقًا. فقد كتبت إيفيلين فوكس كِلر (Evelyn Fox Keller) فى كتابها «البحث عن معنى للحياة : Making Sense of Life) » الذى يتناول تاريخ البيولوجيا الحديثة، تروى الجهود فى بدايات القرن العشرين لاكتشاف سر الحياة من خلال بناء أنظمة حياة اصطناعية وتخليقية: "يبدو المسار واضحًا: فلم تكن الإجابة عن التساؤل عن ماهية الحياة بالاستقراء(*) ، وإنما بالإنتاج، وليس بالتحليل وإنما بالتخليق"(٤). وهذا الناتج الجانبى للبيولوجيا التجريبية وصل إلى الذروة، أو إلى الحضيض، وفق الرأى الذى تعتنقه، فى محاولات ستيفان ليدوك (Stephan Leduc) لتجميع أنظمة فيزيائية وكيميائية صرفة لإثبات سلوكيات تذكرنا بالبيولوجيا. وباعتباره جزءًا من برنامجه لإثبات "السمات الرئيسية للكائن الحى" على المستويين تحت الخلوى والخلوى، بنى ليدوك أنظمة كيميائية ادعى أنها تكشف عن انقسام ونمو خلويين بل وعن حركة

(*) الاستقراء: هو تتبع الجزئيات للتوصل منها إلى حكم كلى أو نتيجة: (المترجم)

خلوية[٤]، واستخدم فى وصف تلك السمات والأشكال مصطلحات الانتشار والضغط الأزموزى وهى من الظواهر الفيزيائية المعروفة. ومن المهم أن نذكر أن تلك الجهود فى سبيل تخليق أنماط مشابهة للحياة اعتمدت على التجربة مثلما اعتمدت على نظريات ابتُكِرت لوصف الفيزياء والكيمياء الخاصة بأنظمته التخليقية. بمعنى أن ليدوك حاول أن يتبع برنامجاً محدداً يستخدم مبادئ فيزيائية لشرح ظواهر بيولوجية. وقد شرح هذه الجهود فى مقال استعراضى صدر أيامها باسم «البيولوجيا التخليقية.[٦] La Biologie synthétiqu»

وفى حين كان الاستقبال المبدئى لبحثه إيجابياً إلى حد ما، فإن ادعاءات ليدوك المتسمة بالمبالغة حول نتائج عمله، وتنامى التقدير العام للآليات البيولوجية المعقدة التى تتحدد من خلال التجارب بالأنظمة الحية، أديا إلى رد فعل عنيف تجاه استيعاب البيولوجيا من خلال البناء. وبحلول ١٩١٣ كتب معلق يقول "إن تفسيرات مستر ليدوك خيالية ... بدرجة أنه من المستحيل أن نأخذها على محمل الجد"[٧]. وتسجل كلٍ الواقعة فى إطار الجدل التاريخى العام حول دور البناء والنظريات فى البيولوجيا. وكان العلماء المناصرون لدور التخليق وللجهود المتعلقة به والخاصة ببناء توصيفات رياضياتية للبيولجيا، كانوا يُنظر إليهم بازدراء من جانب أقرانهم. ولعل البيولوجيين الرياضياتيين والبيولوجيين التخليقيين فى مطالع القرن العشرين كانوا يضعون تفاسير لأعمالهم أكبر مما تسمح به المعطيات المتاحة، مدفوعين إلى ذلك بالتقدم فى الفيزياء وقتئذ.

وكاستجابة لما كان تشارلز دافنبورت (Charles Davenport) يرى فيه نظرية جامحة، اقترح سنة ١٩٣٤، "ما نحتاجه فى الوقت الحاضر هو مزيد من القياسات وإقلال من النظريات ... وثمة تشوش محزن بين البيولوجيا الكَمية والبيولوجيا الرياضياتية، وإلى أن تعطينا القياسات الكَمية مزيداً من حقائق البيولوجيا، أفضل العلم السابق على العلم اللاحق"[٨]، وأعتقد أن هذه الملاحظات لا تزال مناسبة اليوم. وقد فشل ليدوك والتوجه الذى تبناه لأن الأجزاء البيولوجية الحقيقية أكثر تعقيداً، وتتبع قواعد مختلفة عن أنظمته الكيميائية البسيطة، رغم جمالها.

وبعد ذلك بثمانين سنة بات العالم يبدو مختلفًا. فقد ازدهرت التوجهات الرياضياتية فى البيولوجيا، وبخاصة فى تفسير المجموعات الكبيرة من البيانات التى أفرزتها دراسة كل الجينات والبروتينات العديدة الموجودة فى كل كائن. غير أنى أظن أنه من الأهمية بمكان أن نعترف أنه ليس كل البيولوجيين يتفقون على أن التوجه التخليقى سوف يفرز حقائق قابلة للتطبيق فى حالة الأنظمة المعقدة التى تطورت على مر بلايين السنين. وليست كل تلك المخاوف دون أساس، لأن البيولوجيا، كما يشير الاقتباس من تشارلز دافنبورت، كانت تقليديًا تحقق نجاحات أكبر عندما كانت تحكمها بيانات جيدة وليست النظريات.

البيولوجيا التخليقية الحديثة

إن إعادة الإحياء للجهود الحديثة الرامية إلى بناء أنظمة حية لها أوجه متعددة فى مواقع كثيرة حول العالم. ويعمل العلماء جاهدين فى سبيل توسيع نطاق الكيمياء الحيوية الأرضية، وهم لا يكتفون فقط بتغيير تتابع الشفرة الجينية وإنما أيضًا محتواها إلى ما هو أبعد من الأزواج المكونة من أربع مواد قاعدية. وثمة جهود أخرى تعمل على إدخال أحماض أمينية جديدة إلى الأنظمة الحية وهى أحماض لا وجود لها فى أى كائن حى. ومن خلال هندسة البروتينات والدوائر الجينية نجد أن «البيولوجيا التخليقية» فى حالة ثوران كامل. وقد بدأ تعبير «البيولوجيا التخليقية» يتسلل ببطء إلى الأدبيات العلمية والجماهيرية.

كان أول استخدام حديث لهذا التعبير فى مقالة صدرت سنة ١٩٧٤ وكتبها فاكلاف زيبالسكى (Waclaw Szybalski) استعرض فيها التقدم الحادث فى فهم النسخ والترجمة: "حتى الآن نحن نعمل على المرحلة التوصيفية للبيولوجيا الجزيئية ... ولكن التحدى الحقيقى سوف يبدأ عندما نشرع فى إدخال البيولوجيا التخليقية مرحلة البحوث فى مجالنا. وعندئذ سوف نبتكر عناصر جديدة للسيطرة ونضيف وحدات القياس تلك إلى الجينوم الموجود أو نبنى جينومات جديدة كل الجدة"[٩].

استحضر زيبالسكى هذا التعبير مرة أخرى، وأعاد استخدامه فى مقال افتتاحى احتفالاً بجائزة نوبل فى الفسيولوجيا أو الطب، والتى مُنِحت لاكتشاف الإنزيمات التى تتيح استخدام تقنية الدنا المؤتلف أو المعاد تجميعه (recombinant DNA technology)[١٠]. وعملية لصق جين مأخوذ من كائن ما فى كائن آخر لا علاقة له به هى عملية تماثل بصورة فضفاضة تخليق فوهلر لجزىء عضوى: فهى القدرة الأساسية التى يحتاجها بناء أنظمة بيولوجية تخليقية ومن ثم البدء فى تحديد قواعد البناء. ولقد كان الطريق الذى تتجه إليه البيولوجيا واضحاً منذ عقود، على الأقل بالنسبة للبعض.

وثمة استعراض أكثر حداثة يصنف الجهود التى بُذِلت فى هذا المجال الوليد على النحو التالى:

> **يمكن تصنيف البيولوجيين التخليقيين إلى مجموعتين عريضتين. إحداهما تستخدم جزيئات غير طبيعية فى استنساخ سلوكيات ناشئة من البيولوجيا الطبيعية، بهدف خلق حياة اصطناعية. أما المجموعة الأخرى فتبحث عن قطع قابلة للتبادل فى البيولوجيا الطبيعية لتكون منها أنظمة تعمل بصورة طبيعية. وبصرف النظر عن أى من هاتين السبيلين، يجبر الهدف التخليقى العلماء على الولوج فى مناطق مجهولة لمواجهة مشاكل ليس من السهل حلها من خلال التحليلات[١١].**

ومرة أخرى نحن نواجه فكرة أن بناء أشياء جديدة يجبرنا على الاعتراف بوجود مشاكل لا تظهر بالاكتفاء بدراسة الحياة كما نعهدها، ويفرض علينا محاولة حل تلك المشاكل. وتتضح صحة هذا القول سواء كان المرء يحاول إعادة بناء الكيمياء الحيوية من مبتداها أم كان يهدف إلى إعادة تكوين تنظيمات الجينات الموجودة وعملها بحيث تؤدى وظائف جديدة. ولأسباب أرجو أن تصبح واضحة مع التقدم فى الكتاب،

فإن الهدف من بناء أنظمة بيولوجية تخليقية من قطع "قابلة للتبادل"، رغم أنها أمر متهور ويستنفر التحدى، من المحتمل أن يفضى إلى نتائج بأسرع مما يتصور الكثيرون.

إن أوضح الجهود الأساسية فى تعقب ما يطلق عليه أحيانًا «جدول أعمال القطع» تزعمتها فى البدء مجموعة من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. ونجد فى الموقع الإلكترونى (SyntheticBiology.org) أن "البيولوجيا التخليقية تشير إلى كل من (أ) تصميم وصناعة المكونات والأنظمة البيولوجية التى لا توجد فى العالم الطبيعى، و (ب) إعادة تصميم وتصنيع الأنظمة البيولوجية الموجودة بالفعل".

وبعد استعراض تطور تكنولوجيا الطيران فى الفصل السابق، نجد من الطبيعى أن نتساءل عن كيفية بناء أنظمة بيولوجية «وفقًا للمواصفات» بنفس الطريقة التى تبنى بها الطائرات الآن. ولقد رأينا أن الفروقات بين النظامين هائلة. وتذكر أن الخلية تحوى عددًا من القطع المتحركة أكثر بكثير مما هو موجود فى طائرة، وأننا ببساطة لا ندرى حتى الآن كيف نجعل الخلية تطير. ومثلما كانت الحال فى الطيران فى أول عهده، نجد أن التكنولوجيا البيولوجية هى الآن فى مرحلة التحول من الحكايات الكيفية إلى النماذج الكَمية.

وتصميم الطائرات هو مجال بالغ النضج بالمقارنة مع مجال تصميم الأنظمة البيولوجية. وثمة أيضًا فروقات جوهرية فى المكونات المتاحة للاستخدام الفورى. وبخلاف الطيران فى عهوده الأولى، والذى كانت كل مكوناته تصنع من الصفر، يتطلب بناء غالبية الأنظمة البيولوجية الجديدة فى الوقت الراهن استخدام مكونات جزيئية تطورت على مدى عدة بلايين من السنين. والصعوبة الرئيسية التى يسببها ذلك المطلب هو أننا لا نعلم بعدُ كيف تعمل كل تلك المكونات. ومن بين أسباب هذا الجهل أن الفيزياء التى تتحكم فى سلوك الجزيئات مختلفة عن الفيزياء التى تعودنا عليها وتفصلها عنها مسافات شاسعة. والبدهيات الآلية التى نمتلكها والخاصة بالتروس والمحركات والحِزم والكابولى ليس من الممكن ببساطة تحويلها إلى جزيئات. كما أن

مقاييس الحجم الجزيئى للمكونات يجعل من العسير أن تتواصل معها مباشرة، مما يزيد فى تعقيد اختبارات النماذج من خلال التجارب. ولا تزال السمات الرئيسية المستخدمة فى تشغيل الجينات وإيقاف عملها، وفى صناعة البروتينات، لا تزال غامضة. وكما تناولنا فى الفصل الثانى، فإن تصميم الأنظمة البيولوجية ليس مجرد تصور لشكل جديد من أشكال لعبة الليجو. غير أنه حتى مع قصور معارفنا عن التفاصيل البيولوجية، فإن فلسفة تصميمٍ مبنيةٍ على أجزاء قابلة للتكوين لا يزال لها استخدام. وفى هذا المجال نجد أن الرسوم التحضيرية، والتى تُبنى على تعميمات التفاصيل الجزيئية وتجريداتها، يمكن أن تكون ذات فائدة.

وتستخدم الرسوم التحضيرية فى الكيمياء فى وصف أحوال الذرات والجزيئات، ويمكنها، إن عرفت كيف تقرأها، أن تتنبأ بنتائج التفاعلات الكيميائية. ولكى نستفيض فى ذلك نقول إننا نجد فى فيزياء الطاقة العالية، أن الأنظمة البيانية قد تطورت بحيث تسمح بمشاهدة التفاعلات بين الجسيمات، مما يتيح التنبؤ بها ومشاهدتها بطريقة مريحة وكذلك إجراء الحسابات عليها. ورسومات فينمان البيانية، والتى ابتكرها ريتشارد فينمان، هى رسوم متحركة لها تفسيرات رياضياتية صارمة. فهى تحوى علم الجبر - وهو بمثابة علم النحو لها - الذى يتحكم فى الرسومات البيانية وترجمتها إلى رياضيات.

وتلعب الرسوم التحضيرية بالفعل دوراً فى فهم البيولوجيا، سواء بتصويرها للتفاعلات الجزيئية أو بعرضها لما تحويه الجينات من معلومات[١٢]. ومع توفر مستوى معقول من المعلومات عن علم الوراثة والكيمياء الحيوية، يمكن قراءة الجينات وتسلسل البروتينات وكأنما هى لغة إنجليزية. ويمكن أن تفيدنا التركيبات الكيميائية فى تصور التفاعل بين جزيئين بيولوجيين. وعندما تكون الظواهر غير قابلة للمشاهدة المباشرة بالمجهر، تستخدم الرسوم التحضيرية أحيانًا لاقتراح نماذج للتنظيمات والوظائف الخلوية.

ولا تستطيع الرسوم التحضيرية أن تجعل العلم أسهل على الدوام. وعلى مستوى الرسوم التحضيرية يكون التنبؤ بنتائج تجميع تركيبات بيولوجية جديدة، سواء كانت جزيئات أم كائنات، أشد صعوبة بكثير من تصور كيف ستبدو تركيبة جديدة للعبة الليجو. ويضاف إلى حقيقة وجود أنواع عديدة من الليجو البيولوجي أكثر بكثير من أعداد الطوب البلاستيكي، أن طوب البناء البيولوجي ينزع إلى تغيير أشكاله وألوانه في كل مرة ترتبط قطعتان منها سويًا.

في الطريق إلى "نموذج" معياري في البيولوجيا

جاء أول برهان «تجاربي» يربط بين المعلومات الجينية المتوارثة وبين الدنا سنة ١٩٤٤، في صورة رسوم متحركة تتحدث بلغة الطبيعة. فقد وصف أوزوالد أفري وكولين ماكلاود وماكلين مكارتي تفاعلاً كيماويًا استخلصوا به جزيئًا طويلاً من إحدى سلالات «الجرثومة المكورة الرئوية» (pneumococcus)، وأطلقوا على هذا الجزيء اسم «قاعدة التحول»، وعندما يتم زرع هذا الجزيء في سلالة مغايرة يحفز على تبني سمات السلالة الأولى، كما أثبتها وجود جزيء معين على السطح الخارجي للجرثومة المتلقية للزرع. واقترح المؤلفون أن "سلوك تلك المادة في صورتها النقية يتسق مع المقولة البيولوجية بأن النشاط البيولوجي هو من سمات الحمض النووي عالي التبلمر"؛ غير أنهم أضافوا تعليقًا "بالنظر إلى الوضع الراهن للمعارف، فإن أي تفسير للآليات الخاصة بالنقل يصبح بالضرورة أمرًا نظريًا بحتًا"(١٣).

وختم أفري ورفاقه المقال بمقولة بسيطة: "إن البرهان الذي قدمناه يؤيد الاعتقاد بأن حمضًا من الأحماض النووية (من نوع الدي أوكسي ريبوز) هو الوحدة الأساسية في «قاعدة التحول» الخاصة بالنوع الثالث من الجرثومة المكورة الرئوية". ويشكل تعميم هذه المقولة وفهم الآليات التي يشفر بها الدنا المعلومات مع إمكانية نقلها بين الكائنات، يشكل مشروعًا لا يزال بداهة ساريًا. ووضع نموذج الدنا باللغة الطبيعية

بوصفه «قاعدة تحول» الأساس لكل نموذج آخر للنظام، سواء كان فيزيائيًا أم رمزيًا أم جبريًا أو بيانيًا.

ويتكون الرسم التوضيحى الشائع والحديث للدنا من سلم ملتوٍ على محوره الطولى مكونًا حلزونًا مزدوجًا، ويكمل التفافة واحدة كل نحو عشر درجات. ودرجات هذا السلم هى جزيئات تشكل المعلومات الجينية. وأحيانًا تُختصر هذه الجزيئات إلى الحرف الأول من أسمائها، مثل .A, T, G, C, وهناك زوجان قاعديان مكملان فى كل درجة سلم: A مقترنة مع T، وG م قترنة مع .C ويتكون الجينوم البشرى من نحو ٣ بلايين من تلك الأزواج القاعدية، ومقسمة إلى ٢٣ زوجًا من الكروموسومات المحشورة فى نواة الخلية. وكل كروموسوم هو جزىء متلاصق من الدنا يبلغ طوله عدة ملايين من الأزواج القاعدية المنتظمة على صورة جينات. وعادة ما تتكون الجينات من ما يقرب من ألف قاعدة. وتحتوى الكثير من الجينومات، البشرية منها وغير البشرية، على أطوال من الدنا لا يبدو أنها تحوى أية جينات.

وتبدأ حصيلة المعلومات من الجينوم بالتعبير عن قدرة الجين فى تعديل البروتينات على النحو التالى: الجزىء المُبَلمِر (البوليميريز) هو بروتين يقرأ جينًا من الجينات، ويبدأ العمل فى اتجاه معين على إحدى جديلتى الدنا، محولاً الدنا إلى رنا. ومن بين المهام الرئيسية للرنا نقل المعلومات من الجينات فى النواة إلى آليات الخلية من أجل صناعة البروتينات. ويتحدد الجين عن باقى الحروف فى الكروموسوم بالتتابعات القصيرة للقواعد فى طرفيه، وهى التى تخبر المُبَلمِر من أين يبدأ النسخ وأين يتوقف. وهذا، من الناحية العملية، هو التعريف الجزيئى للجين – فمجموع الحروف بين إشارتى «ابدأ» و«قف» هى ما يقرأها المُبَلمِر، وينسخها إلى رنا، وفى النهاية يترجمها إلى بروتينات. وعند هذه المرحلة من الفهم لغالبية الجينومات، نجد أن هذا هو المعيار الوحيد للتعرف على العديد من الجينات. ولا نعلم عن غالبية الجينات البشرية إلا ما يزيد قليلاً على ذلك، لأنه من الأسهل كثيرًا أن نقرأ الجين عن أن نحدد وظيفته. وفى

الحق، لم نتمكن حتى الآن من ربط وظائف محددة بغالبية تتابعات الدنا التى تم التعرف عليها من خلال التعريف الجزيئى «للجين».

وكلمة «جين» لها معنى آخر، مشتق من الدراسات التقليدية للوراثة، والتى نجد فيها أن فكرة الجين تُستَخدَمُ لتتبع مسار السمات والخصائص فى الأجيال. وتثبت الدراسات التقليدية للشعر ولون العيون وللأمراض مثل سرطان الثدى وفقر الدم المنجلى (sickle-cell anemia) أنه بالنسبة لسمات كثيرة ثمة وحدة أساسية للوراثة تنتقل من جيل إلى الجيل التالى له. وفى البحث الذى قدمه أفرى ورفاقه سنة ١٩٤٤، استخلص المؤلفون نتائجهم التجاربية من التخمينات النظرية السائدة وقتئذ، وقرروا أن "المادة المُستَحِثَّة يمكن تشبيهها بالجينات، وأن «الجزىء» الناتج استجابة لها قد اعتُبِرَ منتجًا جينيًا". وذلك يعنى أن الباحثين كانوا يؤكدون أن "المادة «المستحثة» كانت تشكل تعليمات لسلوكيات جديدة، كانت، فى هذه الحالة، تعليمات لصنع جزىء معين.

ويشكل إدراك أن بعض السمات القابلة للتوريث ترتبط بالمحتوى المعلوماتى فى تتابع القواعد، أى ارتباطها بجين وحيد، انتصارًا رئيسيًا للبيولوجيا الحديثة. وهناك أمراض مثل فقر الدم المنجلى والليفة الكيسية (cystic fibrosis) وبعض أنواع سرطان الثدى يمكن أن تُعزَى إلى تغيرات فى جين وحيد. والأمراض المرتبطة بجين وحيد هى أسهل الأمراض فى التعرف عليها؛ وهى الثمار الدانية سهلة القطاف للطب الجزيئى. غير أن سمات عديدة يبدو أنها تحددها جينات متعددة أو التفاعلات بين جينات متعددة. ولسوف تمضى سنون طويلة قبل أن تُفهَمَ تلك التعقيدات. وإلى أن يحين ذلك الوقت ستكون أغلبية الباحثين مشغولين بفرز ما تعبر عنه الجينات الوحيدة وترمز إليه.

ونعود إلى التعبير بالرسوم التحضيرية لوصف ما تعبر عنه الجينات فنقول إن مُبَلمِراً ينسخ الدنا إلى رنا، وهذا الأخير بدوره يُترجَم إلى بروتين بواسطة آليات جزيئية أخرى. وتستطيع السَلسَلات المنتظمة للدنا الملاصقة للجينات أن

تؤثر فى معدلات التعبير عن الجينات وتحت أية ظروف. ويشكل تحول المعلومات من دنا إلى رنا إلى بروتينات «الأركان الاعتقادية المركزية» للبيولوجيا الجزيئية، كما أطلق عليها فرانسيس كريك (Francis Crick) سنة ١٩٥٧[١٤]، والكم المتاح من المعارف الخاصة بالأركان الاعتقادية المركزية يكفى لفهم التفاصيل البدائية لغالبية التطورات الحالية فى البيولوجيا التخليقية. ومع التوغل فى هذا الكتاب سوف أعطى أمثلة لا تكفى فيها الأركان الاعتقادية المركزية لشرح أساليب عمل البيولوجيا، والتى تحتاج فيها الرسوم التحضيرية لأن تكتسب بعداً جديداً لكى تعبر بصدق عما نعرفه عن العالم الحى.

ولا يستخدم باقى هذا الفصل سوى أبسط أوصاف للرسوم التحضيرية للبيولوجيا الجزيئية الأساسية. وينبنى الوصف على ثلاثة أمثلة للأنظمة البيولوجية المصممة التى توضح النواحى المختلفة للتحديات الأربع التالية: (١) تحديد الخواص الفيزيائية للمكونات الجزيئية، (٢) بناء النماذج ومحاكاتها، (٣) استخدام المكونات التى تم تحديدها، وأخيراً وهو أهمها (٤) بناء كيانات بيولوجية جديدة مبنية على تصميمات كَمية تنبؤية.

ونجد أن بعض الدوائر البيولوجية التخليقية أكثر حساسية لمبدأ عدم اليقين من غيرها. وفى المثال الأول أدناه عملت الدائرة كما تنبأت بها المحاكاة فى الجانب الأعظم منها، لأن التصميم كان غير حساس لسمات فيزيائية مجهولة للأداة. ولما كانت الدائرة قد بُنيت من عدد صغير من القطع غير المتحركة وغير المهندَسة فقد تم تصميمها بغرض المحافظة على استجابة ثابتة لإشارة بعد توقف الإشارة. ولعل ذلك هو أبسط مثال لنظام بيولوجى بُنى لكى يستجيب لبيئته بتغيرات ثابتة.

والمثال الثانى هو دائرة أقل فى قدرتها التنبؤية لأنها صُممت بافتراض فهمٍ أشد تكاملاً لجزيئات معينة عما يحدث فى الحقيقة فى ذاك الوقت. وكان من المفترض أن تعرض الدائرة تأرجحات دورية قابلة للتنبؤ بها. واحتاجت هذه السلوكيات إلى محاكاة

أكثر تعقيداً من المثال الأول، وكشفت المحاكاة عن أن التصميم احتاج إلى بروتينات معدلة لكى يعمل كما قُصد به.

والمثال الثالث والأخير يشمل بناء أدوات للتصميم لعدد كبير من القطع فى كائنين اثنين معقدين. وهو محاولة لنمذجة عدوى فيروسية على مستوى الخلايا الوحيدة، وهى خطوة أولى جسورة تجاه بناء شىء مشابه لنموذج طيران لنظام بيولوجى.

المثال رقم ١ : مفتاح جينى

فى يناير ٢٠٠٠، نشر تيم جاردنر وتشارلز كانتور وجيم كولينز، وكلهم من جامعة بوستون، نشروا مقالاً فى مجلة «نيتشر» وصفوا فيه مفتاح تحويل جينيًا صنعوه فى جرثومة الإشكريشة القولونية (E. coli)[١٥]. وهو مفتاح مزدوج الثبات بمعنى أن له حالتين من الثبات، حالة تشغيل وحالة إيقاف، تتحكم فيهما تغيرات فى درجة الحرارة أو استخدام إشارة كيميائية، وكانت فى هذه الحالة جزيئًا يسمى «آى بى تى جى» (IPTG) وعندما يتم تشغيل المفتاح تبدأ الجرثومة فى صنع بروتين يشع لونًا أخضر (اسمه GFP، ومأخوذ أصلاً من قنديل البحر) ويتوهج باللون الأخضر تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية؛ وعندما يكون المفتاح فى حالة إيقاف تتوقف الجرثومة عن صنع هذا البروتين، وما يتبقى منه تتضاءل كميته ببطء حتى تصير الجرثومة معتمة.

وأطلق جاردنر ورفاقه على هذا العنصر الجينى الوظيفى اسم «البرنامج الجينى الصغير» (genetic applet)، على اسم البرامج الحاسوبية الصغيرة المكتوبة بلغة جافا وصُمم كى يعمل مستقلاً ذاتيًا ويتنقل بسهولة بين المنصات الحاسوبية وأنظمة التشغيل. ومن الأرجح أن الدائرة الجينية التى تعمل كمفتاح تكون مكوِّنًا أساسيًا مفيداً فى البناء أو فى السيطرة على الأنظمة البيولوجية الأكثر تعقيداً.

استخدمت السمات الفيزيائية للمكونات الموجودة طبيعيًا فى بناء نموذج. واختلفت توجهات جاردنر ورفاقه عن الجهود السابقة بأنها سيطرت على سلوك الدائرة الجينية من خلال تركيبتها وليس بواسطة هندسة قطع معينة للعمل بطرق معينة. فقد استخدموا شبكة صغيرة من البروتينات والجينات الموجودة طبيعيًا وتنبأوا، بواسطة نموذج كَمى، بالكيفية التى سوف تتفاعل بها تلك القطع لخلق السلوك الجديد المطلوب.

وقد أُخذت الكِسرات والأجزاء التى استُخدِمت فى المفتاح من كائنات عديدة مختلفة. وسبق أن استعان أناس آخرون عديدون بهذه القطع فى استخدامات مختلفة، ولكنها لم يسبق من قبل تجميعها لهذا الغرض. والأمر المهم هو أن السلوك الكَمى لكل هذه القطع منفردةً إما أنه كان قد سبق تحديده فى جرثومة الإشكريشيا القولونية أو تم قياسه بواسطة جاردنر أثناء إجرائه لبحثه، ملخصًا نفس تعاقب الأمور - من نموذج اللغة الطبيعية إلى النموذج التجريبى إلى النموذج الكَمى التنبؤى - الذى سمح بتطور الطيران. وذلك يعنى أن السمات الفيزيائية للبروتينات والجينات كانت بالفعل متطورة بكفاءة. وسَهَّلَ وصف كل قطعة على حدة عملية بناء النموذج الكَمى لسلوك القطع عند تجميعها لتكوين دائرة. وبهذا أمكن بناء الدائرة سواء على الورق أو بداخل أحد الكائنات.

قد يكون من الصعب التعامل مع عناصر الدائرة التى تطورت من خلال عملية النشوء والاتقاء، غير أنها رغم ذلك قابلة للفهم. وتستحق تفاصيل هذا العمل أن نتدارسها. فليس العلم حاذقًا فحسب وإنما بناء «المفتاح» يعطينا فكرة عن نمط عناصر الدائرة الجينية التى طورتها الطبيعة على مر عدة بلايين من السنين. والبيولوجيا قد استقرت على آليات تبدو معقدة لأول وهلة. وبعد عدة سنوات على هذا الدرب قد يصبح من الممكن بناء جزيئات وآليات جديدة تمام الجدة تفعل بالضبط ما نريده بصورة مباشرة. وحتى يحين ذلك الوقت علينا أن نستفيد مما نكتشفه فى الكائنات المتاحة أمامنا.

الوحدات الجينية الرئيسية التى استخدمها الباحثون فى جامعة بوسطون هى «المُرَوِّجات القابلة للاستنفار: inducible promoters »، وقد أُطلق عليها هذا الاسم بسبب أنه حدث فى وقت مبكر يعود إلى سنة ١٩٠٠ أن اكتُشِف أن إشارة من خارج الخلية يمكن أن تستنفر الخلية لإنتاج بروتينات معينة[١٦]. ولا يعمل المُرَوِّج مباشرة لتعزيز إنتاج البروتينات. وإنما يعمل بالتداخل فى عمل «كابح» (repressor)، وهو بروتين يثبط النسخ بواسطة الالتصاق بمنطقة فى الدنا تسمى 'المُرَوِّج'. وهذا المُرَوِّج يستبق الجين، أمام تتابع «ابدأ»، وهو الموقع الذى فيه يلتصق المبلمر بالدنا ويبدأ النسخ. والبروتين الكابح، بعد الالتصاق مع المُرَوِّج، يسد طريق الوصول إلى المُرَوِّج بطريقة فعلية فلا يتمكن المبلمر من قراءة الجين. وعندما تصل الإشارة المُسْتَنْفِرةُ المناسبة إلى الخلية فإنها تمنع الكابح من الالتصاق بالدنا. وبدلاً من أن تعمل مباشرة على إنتاج الرنا الرسول (mRNA) » والبروتينات، فإن المُرَوِّج يعمل من خلال تثبيط سلبى مزدوج: أى تثبيط التثبيط. وفى حين أننا قد نتمنى أن نصنع بناء مبسطًا، أى يحوى جزءًا واحدًا متحركًا، فإن النشوء والارتقاء قد استقرا على تشغيل أكثر تعقيداً للمروجات القابلة للاستنفار. وهو الأمر الذى يحتاج المزيد من الجهد سواء فى الفهم أو فى التصميم. غير أن تلك هى الأدوات التى زودتنا بها الطبيعة.

وباستخدام زوج معين من العناصر الكابحة المتطابقة مألوفة عند البيولوجيين لأعوام عديدة، تمكن جاردنر وكانتور وكولينز من خلق دائرة ذات وضعين للثبات، يستطيع فيها أحد الجينات الكابحة، عند وضعه فى وضع التشغيل، من إنتاج الرنا الرسول والبروتينات. وتم تنفيذ ذلك بخلق أنشوطة سيطرة صغيرة ومتماثلة على جزء دائرى من الدنا. ونظم الفريق البروتين الناتج من الجين الكابح الأول (أ) بحيث يثبط نسخ الجين (ب) الذى يشفر للكابح الثانى. وبالمثل، يثبط الكابح الثانى نسخ الكابح الأول؛ فالبروتين الناتج من الجين (أ) يثبط الجين (ب)، والبروتين الناتج من جين (ب) يثبط الجين (أ). وتقليب المفتاح من حالة إلى الأخرى يتم بواسطة الإشارة المُرَوِّجة، التى تتداخل مع البروتين الكابح الذى يكون فى وضع التشغيل فى تلك اللحظة، وبهذا تسمح بنسخ الكابح الآخر.

وعلى الرغم من الطبيعة الغامضة للمصطلحات البيولوجية، فإن سلوكيات الدائرة بسيطة ومحددة تحديداً جيداً. فتسخين الخلية يُشغِّل المفتاح وإضافة جزىء «ى بى تى جى» (IPTG) يطفئه.

وتحكى الفقرة السابقة قصة تصف سلوكيات الدائرة. ويتطلب التنبؤ الصحيح بالكمية المطلوبة من المُرَوِّج مزيداً من الجهد، بمعنى أن الأمر يتطلب بناء نموذج رياضياتى مبنى على السمات الفيزيائية للبروتينات الكابحة ومكونات النسخ والترجمة. وقد أدت الجهود السابقة لتحديد السمات التفصيلية لفيزياء الأداة إلى إنتاج توصيف دقيق بما يكفى لبناء مفتاح على درجة معقولة من الثقة فى أنه سيعمل كما هو متوقع منه. وكما جاء فى مجلة «نيتشر»، نجد أن التنبؤات الكَمية لسلوكات المفتاح المبنية على النموذج كانت دقيقة بصورة معقولة، ولكن سبب ذلك أن سلوكيات المفتاح ذى حالتى الثبات ليست بالغة التعقيد. وكان تشغيل المفتاح غير معتمد على بعض تفاصيل السمات الفيزيائية الأقل شهرة. ونجد أن بناء دائرة جينية ذات سلوكيات تتغير باستمرار يعقد الأمور كثيراً، كما سنرى فى المثال التالى.

المثال رقم ٢ : المتذبذب الجينى

من الغريب أن المثال الثانى نُشِر فى نفس العدد الذى نُشِر فيه مقال «المفتاح الجينى». فقد بنى مايكل إلويتز وستان ليبلر، وكان كلاهما فى جامعة برنستون آنذاك، دائرة جينية متذبذبة داخل جرثومة الإشكريشيا القولونية[١٧]. ومثلما كانت الحال فى المفتاح الجينى، أتت المادة الخام من تنوع من الكائنات. وبالتشابه مع التصميم الأساسى للمفتاح الجينى، اعتمد المتذبذب الجينى على تثبيط النَسخ، ولكن باستخدام ثلاثة عناصر كابحة بدلاً من اثنين. وخلقت إضافة عنصر ثالث أنشوطة أطول للسيطرة، وسارت عملية الكبح حول تلك الأنشوطة بتأخر زمنى واضح بين أحداث النسخ لأى من الكوابح الثلاثة؛ فالبروتين الناتج من الجين (أ) ثبط الجين (ب)، والبروتين الناتج من

الجين (ب) ثبط الجين (ج)، والبروتين الناتج من الجين (ج) بدوره ثبط الجين (أ) حول الأنشوطة. وبعد أن نشطت الدائرة وبدأت في العمل، كان المستهدف أن تتذبذب مستقلة وإلى الأبد في كل خلية.

أدى الاعتماد على الكبح في صناعة متذبذب إلى أن إلوفيتز أطلق على الدائرة مصطلح «كابح متذبذب : repressilator» ومرة أخرى، أُخذ نسخ (GFP) على أنه مؤشر يدل على سلوكيات الدائرة. وتُعتبر العملية ناجحة عندما يتذبذب الاستشعاع الأخضر في كل جرثومة. ولعله بسبب أن «الكابح المتذبذب» كان مصمماً بحيث يعمل بفاعلية مستمرة، فإنه كان حساساً بصورة أكبر لسمات فيزيائية غير معروفة بالتفصيل، مثل الالتصاق التوافقى مع البروتينات المثبطة للدنا وطول أعمار البروتينات المثبطة داخل الخلية.

المحاكاة أشارت إلى أن التذبذب قد يتطلب مكونات اعتيادية:

التصميم التقريبى وحده هو المتاح مع محدودية المعلومات. ويمكن التوصل إلى التفاصيل التخصصية بالمحاكاة فى نموذج، يشابه فى تركيبته النموذج المستخدم فى صنع المفتاح الجينى فى جامعة بوسطون. وجعل الإنتاج الثابت للبروتينات من المفتاح ذى حالتى الثبات غير حساس لطول بقاء تلك البروتينات فى الخلية. وبدلاً من إنتاج سلوكيات ثابتة، فإن «الكابح المتذبذب» اعتمد على تغيير مستمر لتركيز البروتينات باعتبارها جزءاً من آلياته الداخلية. وكشفت محاكاة «الكابح المتذبذب» أنه إذا كانت فترة حياة البروتينات الكابحة أطول من اللازم، فإن الدائرة سوف تنتج إنتاجاً ثابتاً لنوع واحد فقط من البروتينات بدلاً من تذبذب متتابع لكل الثلاثة.

وكما تبين، فإن فترة الحياة الطبيعية للبروتينات كانت فى الحقيقة أطول مما يجب. ولهذا أنتج إلوفيتز إصدارات معدلة لتقريب المسافة بين النمذجة والتجربة. وأُعيد بناء البروتينات مع بطاقة صغيرة على أحد طرفيها تعزز تداعى البروتين. ويتعرف الإنزيم بروتييز على البطاقة فى جرثومة الإشكريشيا القولونية، ثم يدمر

البروتين المتصل بها، وهى وظيفة مناسبة موجودة مسبقًا للاستعانة بها فى بناء دائرة بيولوجية تخليقية.

لا تُصنع كل المحاكيات متساوية لأن الخلايا لا تُخلق كلها متساوية. ومع توفر مكونات جزيئية جديدة – وهى بروتينات ذات بطاقة بهدف الإسراع النسبى فى تدميرها بواسطة الخلية – فإن التجربة مضت فى طريقها. غير أن الاختلافات بين النتائج التجاريبية ونتائج المحاكاة وضحت فى الحال. وجنح كلٌ من شدة «الكابح المتذبذب» ومدة التذبذب إلى الابتعاد عن قيمتها الأصلية، وبصورة عامة، أصبحت الذرى أعلى وأكثر تباعداً عن بعضها. ونشهد هنا ضبابية النموذج والمحاكاة التى ألمحنا إليها فى مطلع هذا الفصل.

واتضح أن الطريقة التى استُخدِمت لمحاكاة النموذج كانت من العلامات المهمة للتنبؤ الدقيق. وفى حين كانت تركيبة النموذج – وهى معادلة تفاضلية فى هذه الحالة – تتيح للأعداد الأصلية للجزيئات أن تختلف بين الخلايا، إلا أن محرك المحاكاة القطعية (deterministic simulation engine) لم يسمح بتلك الاختلافات؛ فتركيز أنواع الجزيئات داخل خليةٍ ما كانت محددة تمامًا من قبل أن تبدأ المحاكاة. ولما كان من المحتمل ألا توجد إلا جزيئات قليلة من نوع معين فى خلية ما، فإن تقلبات صغيرة فى أعداد تلك الجزيئات يحتمل أن تؤثر فى سلوكيات الدائرة. ويعنى هذا أن النظام الحقيقى عرضة لمزيد من الاضطراب عما تسمح به المحاكاة القطعية. ولكى يتم تنبؤ دقيق فإنه يتعين أن تعكس طريقة المحاكاة هذه التقلبات.

ويكمن أصل المشكلة فى أنه حتى الخلايا المتطابقة جينيًا لا تنتج أعداداً متطابقة من أية بروتينات، حتى تحت ظروف متطابقة. وعندما تكون ثمة ألف نسخة من بروتين ما فى خلية واحدة و٩٩٠ نسخة فقط من نفس البروتين فى خلية أخرى، فليس من المحتمل أن هذا الفرق (١٠ نسخ) بين الخليتين يمكن أن يؤدى إلى سلوكيات مغايرة للخلايا. ولكن إذا كانت خلية تحوى ١٥ نسخة وأخرى بها ٥ نسخ فقط، فإن هذا الفارق يمكن أن تكون له تأثيرات بيوكيميائية كبيرة داخل الخلية. ويمكن أن تنشأ تلك

الاختلافات فى الأعداد من أسباب شتى: فالبروتينات قد تتداعى بطريقة عفوية، كما أنه من الممكن أن تكون هناك اختلافات فى أعداد البروتينات التى تصنعها نسخة ما من الرنا الرسول. ولما كانت وظائف «الكابح المتذبذب» تعتمد على تغيرات تركيز البروتينات، فإنها تكون عرضة لنفس تلك المشكلة.

وبعبارة أخرى، فإن الطبيعة المتقلبة للكابح المتذبذب، وعلى النقيض من التعبير الثابت للمفتاح، تعنى أن السلوكيات الحقيقية للدائرة الجينية يمكن أن تكون أكثر حساسية بشكل ملحوظ للتغيرات الفطرية الكامنة فى النسخ والترجمة والتصاق البروتينات الكابحة بالدنا. وكما شرحنا أعلاه، نجد أن طريقة المحاكاة القطعية الأصلية تجاهلت التقلبات المحتملة، وأكدت أن البروتينات الكابحة الثلاثة سوف تتذبذب بثبات بشدة متساوية (نفس عدد الجزيئات) وفترات زمنية متساوية (نفس الزمن).

وسوف تتيح طريقة محاكاة أقرب إلى الحقيقة المادية لعدد الجزيئات الموجودة فى زمن محدد أن تكون عرضة لتقلبات عشوائية. وهى أوضاع أقرب تمثيلاً للأوضاع الفيزيائية الحقيقية داخل الخلية، أو داخل أى مفاعل كيميائى صغير، من افتراض عدد محدد مسبقًا من المتفاعلات. ولقد بنى إلوفيتز مثل تلك المحاكاة.

وأدت المحاكاة المحسنة إلى إظهار سلوكيات أقرب إلى التجربة، وإن كانت غير متطابقة معها. ويعنى ذلك أنه لا تزال ثمة سمات للآليات الخلوية لا تتضمنها سمات فيزياء الأداة. غير أن الكابح المتذبذب لم يظهر تذبذبات واضحة فى الاستشعاع (fluorescence)، وهذا وحده يكفى لأن نتوقع أن تنتج الجهود المستقبلية نتائج تجاربية أقرب إلى التنبؤات. ومن الصعوبة بمكان أن نقرر بدقة لماذا لا يعكس سلوكُ الكابح المتذبذب سلوكَ المحاكاة. ولا تزال هناك فجوات كبيرة فى معلوماتنا عن الكيفية التى تعمل بها غالبية المكونات الجزيئية. وعلى الرغم من أن أوصاف اللغة الطبيعية للمتذبذب لا تزيد تعقيداتها إلا بمقدار ضئيل عن تعقيدات المفتاح الجينى، فإن اختلافات

السلوكيات بين النموذج الرياضياتى والأنظمة الحقيقية تبرهن على أن قدراتنا على التنبؤ بسلوكيات الأنظمة البيولوجية الاصطناعية لا تزال محدودة.

المثال رقم ٣ : إعادة كتابة برنامج جينى

المثال الثالث للتصميمات البيولوجية البازغة يتضمن فيروسًا، تمت دراسته أصلاً فى الأيام الأولى للبيولوجيا الجزيئية، يتغذى على جرثومة الإشكريشيا القولونية. ويشكل التاريخ الطويل لدراسة ذلك الفيروس الذى يسمى بكتريوفاج ت٧ (bacteriophage T7)، أرضًا خصبة للنمذجة الكَمية. وكما جاء سالفًا، نحن ما زال أمامنا طريق طويل نقطعه فى تعريف السمات الفيزيائية باللغة الطبيعية لغالبية الجينات والبروتينات فى الخميرة، التى دُرِست لمدة أطول من ت ٧، غير أن ت٧ أشد بساطة بكثير، وغالبية مكوناته قد تم وصفها فى القرن العشرين.

فى أثناء وجود درو إندى (Drew Endy) فى المدرسة الثانوية فى مدينة دارتموث شرع فى تجميع كل تلك المعلومات حول الجينات والبروتينات المختلفة فى ت٧، والأدوار التى يلعبها هذا الفيروس وهو يصيب عائله ويدمره[١٨] . وقد بدأ الجهد بكومة من مقالات الأبحاث بلغ ارتفاعها مترين، ولا تشمل المعلومات غير المسجلة التى تنوقلت شفاهًا من باحث لآخر. وكان هدفه أن يركز القصص العديدة والقياسات ويحولها إلى نموذج شامل وتنبؤى من الناحية الكَمية لدورة العدوى بالفيروس وجيناته الستة والخمسين.

وإذا ما شاهدنا ت٧ تحت المجهر الإلكترونى لوجدناه يشبه مركبة النزول على القمر. وتبدأ العدوى عندما تتعرف أرجل الإنزال الموجودة على الفيروس على بروتينات خاصة على سطح جرثومة الإشكريشيا القولونية، و"يرسو" عليها الفيروس ويلتصق بسطح الجرثومة. ويصنع الفيروس ثقبًا فى جدار العائل يدخل منها جينوم الفيروس إلى الخلية العائلة، حيث تُستَنسَخُ جينات الفيروس بالتعاقب حسب ترتيب دخولها.

وتحمل عملية العدوى ما هو أكثر من تشابه عابر للبرامج التقليدية للحاسب، والتى تُنفذ فيها التعليمات فى ترتيب محدد.

ومع المضى قُدُمًا فى عملية العدوى، تُستنفد موارد العائل الجرثومى، وتتكسر تركيبات عديدة فى سبيل المواد الخام الثمينة التى تحويها، وتتجمع سلالة من الفيروس من تلك المكونات. وكان نموذج إندى مصممًا بحيث يحسب عدد السلالات الناتجة من حادثة عدوى وحيدة. ولكن مع الاقتصار على وجود مؤشر واحد من المعطيات للمقارنة – وهو التركيبة الأصلية للجينات فى الفيروس – فإن أى تنبؤ واضح يعتمد على النموذج قد يكون قد نشأ بمحض المصادفة. ولهذا شرع إندى فى تجربة النموذج بشكل يحمل تحديات أكبر بكثير.

وبعد تمام بناء ومحاكاة نموذجٍ للفيروس المحلى القاتل للجراثيم ومقارنة التنبؤات المبدئية من نموذجه مع النتائج التى تم التوصل إليها فى المعمل، كانت الخطوة التالية لإندى هى معرفة ما يحدث عندما يتغير ترتيب التعليمات فى جينوم ت٧، ويمكن تحقيق ذلك فى النموذج بتغيير عدد قليل من سطور الشفرة. ويشمل اختبار تجريبى بناء شاقًا لجينوم ت٧، من جينات أُزيلت من موقعها الأصلى وزُرِعت فى مكان آخر. وهذه هى إعادة هندسة الجينوم.

وحاول إندى ومساعدوه ذلك أول مرة فى سنة ١٩٩٦، عندما كان تخليق أجزاء طويلة من الدنا لا يزال أمرًا باهظ التكلفة وبالغ الصعوبة من الناحية التقنية. وكانت السبل الوحيدة المتاحة أمام إندى هى التقنيات «العتيقة»، والتى تُدخَل فيها الجينات فى مواقع فى الجينوم تكون فيها عرضة للتأثر بالإنزيمات التى تُقَطِّعُ الدنا فى مواقع محددة. ويمكن لصق الجينات الجديدة فى تلك الفجوات.

وفى مرحلة مبكرة من خلق التتابع تم نسخ عدة جينات ت٧ لإغلاق آليات التعبير عن الجينات للجرثومة العائلة، بحيث يتمكن الفيروس من اختطاف الموارد الخلوية للعائل، لتزويد الفيروس الغازى بالمواد الخام الحاسمة، وبهذا يمكن استنتاج أن تلك الجينات موجودة بالقرب من أول الطابور. إلا أنه يبدو لأول وهلة أن مواقع

الجينات الأخرى أقل أهمية. وعلى الرغم من عقود من الخبرات بـ ت٧ ، فإن العلماء لم يستكملوا بعد دراسة كل جيناته. وطبقًا لأدلة جينية سابقة فإن تلك الجينات تنقسم بصورة عامة إلى جينات «أساسية» وجينات «غير أساسية» حسب أهميتها فى دورة حياة ذلك الفيروس. وتحريك جينات من المجموعة الثانية من مواقعها أو إيقاف عملها عن طريق إدراج جينات أخرى، لا يترك أثرًا فى البرنامج الجينى. وعلى الرغم من ذلك، توصل إندى إلى أن إيقاف عمل عدد من الجينات غير الأساسية يؤدى إلى فيروسات تنمو بطريقة ضعيفة. وكثيرًا ما ذكر إندى أن «غير أساسية» تعنى فى حقيقة الأمر «مجهولة».

وعلى الرغم من هذا التناقض والتعقيد، استخدم إندى النموذج للتنبؤ بدقة بسلوكيات نصف سلالات ت٧ التجريبية (النوع البرى بالإضافة إلى ثلاث سلالات اصطناعية). وإضافة لذلك، نلاحظ أن النموذج ملزم فى أنه لا يحوى أية معطيات حرة، فهو لا يحوى عوامل احتيالية تسهل مقارنة المعطيات التجاربية بالمحاكاة. ويمكن استخدام النموذج أيضًا لبحث أداء التركيبة الطبيعية للجينات بالتركيبة المعاد ترتيبها. وبعد أن فحص إندى سلوكيات ما يربو على مائة ألف جينوم بديل عن طريق المحاكاة، تبين له أن نحو ٣ بالمائة فقط تعمل بصورة أفضل من التركيبة الطبيعية. ويعنى ذلك أن ترتيب الجينات فى الفيروس الطبيعى منضبطة بصورة جيدة، ويبدو أن الطبيعة فى هذا المقام قد أتقنت جعل ت٧ أقرب ما يكون إلى الكمال من حيث الظروف البيئية التى يوجد فيها.

ونموذج ت٧ هو فى الوقت الراهن وسيلة فريدة من نوعها لاستكشاف نظام جينى معقد. غير أنه ليس مثاليًا لأنه أول جهد من نوعه. غير أن التحسينات سوف تحدث بالتوصل إلى مواضع أخطائه وأسبابها. ولكى يدرس إندى تلك الأخطاء فإنه يبنى الآن نسخة معدلة من جينوم ت٧ أسهل بكثير فى إعادة تنظيمها. فبدلاً من أن يعتمد على التقنيات التقليدية للصق الجينات، يُخَلِّقُ الآن الجينات من بدايتها – وهى تقنية سوف نتناولها بالتفصيل فى الفصول التالية – لكى يختبر سريعًا التنبؤات التى يخرج بها من النموذج.

نشر إندى أبحاثه فى مجلة «أحداث الأكاديمية القومية للعلوم» – (Proceedings of the National Academy of Science) – سنة ٢٠٠٠ [١٩]، وأمضى السنتين التاليتين يبنى وسائل للمحاكاة فى انتظار أن تلحق إمكانات تخليق الدنا باحتياجات التجارب. والآن يستمر إندى ومساعدوه فى بناء واختبار نماذج أفضل من الفيروس ت٧.

ويحتاج التوجه الذى اختاره إندى تحديداً كاملاً لسمات تلك الأجزاء من ت٧ التى اعتُبِرت غير أساسية، وإعادة بناء الجينوم بطريقة تُبَسِّط إعادة الترتيب. وهو الآن يُخَلِّقُ نموذجًا معدلاً من الفيروس له «أيادٍ» قصيرة للدنا – وهو التتابع الذى يمكن بسهولة التحكم فيها باستخدام أدوات جزيئية أخرى – فى نهاية جينات عديدة مما يسهل تحريك هذه الجينات فى المعمل. كما أن هذا النموذج المعدل من ت٧، والذى يطلق عليه ت٧–١، به خاصية إعادة كتابة الشفرة الجينية التى تتضمن أن تكون جينات نفس الجزء من الدنا التى تتداخل فى السلالة الوحشية من الفيروس، كما يقول إندى، «غير متخمة». وهذا الأمر يقاس بالبرنامج الحاسوبى الذى يقوم بفك الملفات المضغوطة. وفى حين يوضح الإثبات التجاربى الأولى لـ ت٧–١ أن فيروسًا حيًا يمكن تصنيعه بهذه الطريقة، إلا أنه ليس من الواضح ما إذا كان التتابع الجديد أسهل فى نمذجته أو تعديله[٢٠]، ونجاح إعادة الهندسة المثيرة تلك ليست أمراً مضموناً. فالبيولوجيا ليست بسيطة مطلقًا، والوثوب إلى جهود إعادة تشكيل ما يقرب من ٦٠ جينًا مختلفًا هو أمر شاق. ولكن عملية بناء أنظمة بيولوجية معقدة والأدوات الرياضياتية اللازمة لفهمها واستيعابها تمضى فى طريقها حثيثًا.

الختام

فى حين يحتوى نموذج الطيران للطائرة ٧٤٧، على وصف لكل أجزاء الطائرة، نجد أن النماذج البيولوجية الثلاثة التى وصفتها أعلاه لا تتكون إلا من عدد محدود من

المكونات. وتم تحديد السمات الفيزيائية لكل مكون بواسطة قياسات مستفيضة فى المقام الأول بدلاً من المعارف النظرية الموسعة المبنية على المبادئ الأولى. والأمل كبير فى أن تلك القياسات ستأخذ فى الاعتبار كلاً من (١) السمات الفيزيائية المجهولة لكل الجزيئات الأخرى الموجودة فى الخلية و (٢) تأثير تلك الجزيئات على المكونات الخاصة التى يصفها النموذج. ومن بين النماذج الثلاثة التى تناولتها نجد أن نموذج ت٧ هو أشدها تعقيداً، ولكنه ما زال يستبعد الأغلبية الساحقة من المكونات الجزيئية فى الخلية العائلة. والمفتاح والمتذبذب أكثر اختصاراً منه. ويبدو الأمر وكأنما نموذج الطائرة ٧٤٧ لا يحتوى إلا على توصيف لأسطح السيطرة، دون أن يتضمن تفاصيل عن المكونات التركيبية للجناح وهيكل الطائرة.

وعلى الرغم من ذلك، فمع تعقيدات مهمة بناء نماذج تنبؤية للأنظمة البيولوجية الحقيقية، نجد أن تلك الجهود هى بداية انطلاق. وقد تم تطوير الأنظمة الثلاثة التى وصفناها أعلاه فى غضون سنوات قليلة. وأحياناً كان العلماء المعنيون يتقابلون مصادفة فى المؤتمرات ويطلعون بعضهم بعضاً على أخبار التقدم الذى يحققونه فى المعمل، وكلٌ يقرأ أبحاث الآخرين، ويسهمون فى المجتمع العلمى الأكبر. وفى كل تلك الأمثلة لم يكن يُشرع فى إجراء التجارب المعملية إلا بعد بناء نموذج كَمى يعطى تنبؤات بالنتائج. ولهذا أسهمت النماذج فى اختيار الكيفية التى يتم بها تصنيع الأنظمة التخليقية فى المعمل. وهذا هو الإجراء التقليدى فى غالبية مجالات الهندسة الأخرى، ولكنه جديد كل الجدة فى البيولوجيا الجزيئية.

وهذه النقطة من الأهمية بمكان بحيث تستحق التكرار: دوائر المفتاح والكابح المتذبذب، وت٧ صُمِّمَت جميعها لتأدية وظائف محددة مع استخدام النماذج الكَمية البدائية. وهو اتجاه فى البيولوجيا سوف يزداد ترسخًا. فالدوائر الجينية الجديدة التى تُبنَى من أعداد صغيرة من القطع المتحركة سرعان ما سوف تنضم إلى صندوق الأدوات الذى بدأ بالمفتاح والكابح المتذبذب. واستخدام ت٧ يسير بهذا الاتجاه خطوة أخرى إلى الأمام، بمحاولته تتبُّع مسار مزيد من المكونات سلوكياتها كنظام مقيدة

بإحكام بعـــقـــود من الملاحظات وآلاف السنين من التطور. والنمـــاذج التى يمكن استخدامها للتنبؤ بتأثيرات الاضطرابات التى تصيب الأنظمة البيولوجية الموجودة تصبح بصورة واقعية أدوات التصميم لتلك المكونات، وتزودها ببنية تحتية لخلق تقنيات جديدة منبنية على البيولوجيا. وسوف تتمخض الجهود المستقبلية عن نتائج أفضل، مع تكشف التفاصيل الجزيئية لتلك الدوائر.

ويشير دور المحاكاة فى الأمثلة الثلاثة إلى دور مستقبلى للحاسبات فى الهندسة البيولوجية. فبدون الحاسبات كانت محاكاة المفتاح الجينى ستواجه بعقبات وإن كانت ستصبح ممكنة رغم ذلك. وكانت محاكاة الكابح المتذبذب ستصبح بالغة الصعوبة، أما محاكاة ت٧ فإنها ستكون مستحيلة من الناحية العملية. ومع تفاقم تعقيدات الأنظمة البيولوجية ستكون للحاسبات أهمية قصوى فى استكشاف سلوكياتها. بل إن إندى نفسه يدرك أنه بدون الإثبات عن طريق التجريب لم يكن عمله على ت٧ ليؤخذ على محمل الجد.

ويذكر إندى أحيانًا أنه شرع فى مشروعه لأنه، بوصفه ينتمى إلى مجتمع المهندسين لا إلى مجتمع البيولوجيا، لم يجد وسيلة أفضل. وبمعنى آخر، فالمهندس وحده هو من يبذل جهوداً فى المحاكاة على هذه الدرجة من التعقيد. فمن جانب، يحوى ت٧ العديد من الأجزاء المتحركة الموصوفة وصفًا غير دقيق مما يجعل الفيزيائى يفر هاربًا بعد نظرة واحدة تحت غطاء المحرك، وكذلك تشتمل المحاكاة على جانب كبير من الرياضيات بدرجة أنك لا تجد بيولوجيًا واحدًا قد حصل على قدر كاف من التدريب فيها يتيح له أن يتدارسها. وعلى صعيد آخر، نجد أن الفيزيائيين ليبلر وإلوفيتز كانت لديهما الخلفية المناسبة التى مكنتهما من خلق الكابح المتذبذب وتوصيفاته الرياضياتية.

غير أن إسهام البيولوجيين كانت له أهمية قصوى فى الاختبارات التجريبية فى النماذج الثلاثة. ولم يكن الفيزيائيون والمهندسون قادرين سوى على إحراز تقدم ضئيل بدون المعارف المتراكمة عن الوسائل والمعارف التقليدية البيولوجية التى هى جزء من

تعليم البيولوجيين الجزيئيين وخبراتهم المهنية. وهذا العمل التعاونى هو علامة على اتجاه واضح آخر وهو؛ أن التوجه المتعدد الاختصاصات للمشاكل البيولوجية هو النهج السائد الآن. وتلك الجهود تغير من سبل دراسة البيولوجيا، وسوف تترك أثراً مماثلاً على الهندسة البيولوجية.

الفصل الخامس

تاريخ مستقبلى للهندسة البيولوجية

مرحبًا أيها المتسابقون فى موسم آخر فى مسابقة لَبِنَات بناء البيولوجيا! مهمتكم اليوم هى أن تبنوا فى عشر ساعات جرثومة جديدة تتوافق مع التحديات التى سوف نكشفها فى التو. وسوف تستخدمون الدنا المأخوذ من قائمة لبنات بناء البيولوجيا، وكل ما تستطيعون أن تعثروا عليه فى المعمل - ولا تنسوا أن تمسحوا أعلى المنضدة وتحت المكاتب؛ والإنسان يجد أتفه الأشياء هناك - بالإضافة إلى الجينات التى تستطيعون تخليقها وتجميعها فى الوقت المحدد. وتذكروا أن، الفريقين الموجودين هنا فى المعمل ليسا الفريقين الوحيدين المشاركين بل يشارك فى المسابقة أيضاً المتفرجون فى المنازل الذين لديهم الإمكانات المناسبة لذلك. أرسلوا لنا بالبريد الإلكترونى السَلسَلة الذى تتوصلون إليها والبيانات الأيضية مع شريط فيديو وصور فوتوغرافية، وتصبح لديكم فرصة الفوز بالشهرة والثروة. حسنًا، على الأقل الشهرة. وأعرف أن بعض الجامعات ومعامل الشركات مشاركة فى المسابقة كالمعتاد، وأتمنى لكم حظًا حسنًا! ولكنه حدث فى السنوات العشر الأخيرة أن مخترقى البيولوجيا القابعين فى الجراجات قد اكتسحوكم فى كل مرة.

إن مسابقة لبنات بناء البيولوجيا ليست وهمًا وخيالاً؛ بل هي موجودة في الوقت الحالي على صورة مسابقة آلات الهندسة الوراثية الدولية «أي جم» (International Ge netically Engineered Machines, iGEM) التي ينظمها معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (إم أي تي) (MIT) وتجري هذه المسابقة كل صيف، ويشارك فيها طلبة الجامعات من جميع أنحاء العالم. ففي ٢٠٠٦ شارك فيها بضع مئات من الطلبة انتظموا في ٣٩ فريقًا من ٣٧ جامعة يمثلون دولاً مختلفة من العالم[١]، وفي ٢٠٠٧ اشترك فيها ما يقارب ٧٠٠ طالب من عشرين دولة موزعين على ٥٩ فريقًا.

لم تكن الفترة الزمنية الممنوحة لبناء دارات (دوائر) جينية جديدة أثناء «أي جم» بضع ساعات وإنما كانت في الحقيقة عدة أشهر. غير أن هذه الفترة القصيرة نسبيًا هي دليل فعلي على التقدم الهائل الذي أُحرِز في التكنولوجيا أثناء فترة لا تتجاوز خمس سنوات. ولقد نشأت «أي جم» ضمن مقرر دراسي عُقِدَ في معهد إم أي تي أثناء فترة الأنشطة الحرة بين الفصول الدراسية. وفي أول جولة، سنة ٢٠٠٢، استغرق تجميع التصميمات واختبارها الجانب الأكبر من فترة عام؛ وفشلت كلها في العمل كما كانت التنبؤات. وانتهى المشاركون في فترة الأنشطة الحرة الثانية من العمل في نحو ستة أشهر، إلا أنها وللمرة الثانية لم ينتج عنها دارات فاعلة. والآن تبدأ الفرق المشاركة في مسابقة «أي جم» العمل في مشاريعهم في بدايات الصيف، بعد انتهاء الفصول الدراسية، مع تحديد موعد نهائي في أوائل نوفمبر حيث يقام احتفال «أي جم» وفيه تعرض كل الفرق ما أنجزته.

والسبب في أن مسابقة «أي جم» تجري على مدى شهور وليس ساعات هو أن المتنافسين يتعاملون في الوقت الحالي مع قطع غير محددة المعالم ويستخدمون أدوات غير مناسبة للعمل. وهذا هو نفس السبب الذي من أجله احتاجت الدارات البيولوجية التي تناولناها في الفصل السابق كل ذلك الجهد الكبير. ويتسم الجيل الحالي من الأدوات البيولوجية بانعدام التعقيد، بل يمكن مقارنتها بمجموعات

المفكات ومفاتيح الربط الموجودة فى غالبية المنازل. وبالمثل، نجد أن القائمة الحالية للقطع البيولوجية غير مصقولة تماماً بالمقارنة بمفكات القلاووظ المعيارية والمسامير والصواميل الموجودة بجوار صندوق الأدوات. غير أن التحول من أشخاص - سنوات فى إنتاج الكابح المتذبذب والمفتاح الجينى، التى وصفناها فى الفصل الرابع إلى أشخاص- شهور فى فرق «أى جم» هى إنجازات غير مسبوقة. ولقد تزايدت أعداد مشاريع الطلبة التى نُشرت فى الدوريات الأكاديمية أو أنتجت قطعًا سمحت بإجراء التجارب التى أُجريت.

ويعود السبب الجوهرى فى التحسن الكبير الذى طرأ على الإنتاجية إلى وجود «سجل القطع البيولوجية المعيارية». وهو قائمة بقطع بيولوجية والظروف التى جرى بمقتضاها تحديد صفاتها. والقطع مثبتة بالسجل ومحفوظة فى ثلاجة كسلسلات جينية يمكن لصق نهاياتها معًا باستخدام بروتوكولات محددة سواء على الحاسب أو فى أنبوب الاختبار. ومن بين أهداف السجل جمع قائمة بالعناصر الداراتية المفيدة، يحوى تدوين معلومات عن كل عنصر تشمل المكان الذى استخدم فيه وتوجيهات إرشادية تتعلق بالتصميم لدمجه فى تصميمات جديدة. والسجل و«أى جم»، كما يتصور منظموه، هى أجزاء من تجربة كبيرة:

> **نجد من الناحية العملية، أن مسابقة «أى جم» وسجل القطع البيولوجية المعيارية تختبر بطريقة عملية فكرة أن الهندسة البيولوجية يمكن الاعتماد عليها من خلال الاستخدام المجانى على المشاع لقطع معيارية وموثقة جيداً وتسمى «لبنات البناء البيولوجية» (BioBricks) وهذه القطع لها سمات خاصة تتيح إجراء تجميع تكرارى لتكوين «أجزاء مركبة» أطول مما يفضى إلى تكوين أنظمة أكبر.**
>
> **وتواجه فرق «أى جم» تحديات لخلق أجهزة قادرة على العمل بتصميم وتجميع:**

أ) قطع موجودة بالفعل فى السجل. و ب) القطع التى خلقتها الفرق والتى يتعين أن تكون متوافقة مع معايير لبنات البناء البيولوجية. والقطع الجديدة لا بد من توثيقها فى قاعدة بيانات السجل وإرسال عينات منها له. ويتيح ذلك لمهندسى الوراثة المستقبليين أن يبنوا على ابتكارات أولئك الذين سبقوهم ومهاراتهم وخبراتهم[٢].

وبالنظر إلى التقدم الذى أثبتته المسابقة، فإن التجربة يبدو أنها ناجحة.

ويركز «سجل القطع البيولوجية المعيارية» و«أى جم» على دور القطع وتجميعها كإسهام فى تطوير الأنظمة البيولوجية التخليقية. ويعود ذلك جزئيًا إلى أن عددًا كبيرًا من القطع موجودة فى الثلاجات فى أنحاء العالم على صورة جينات مثبتة على بلازميدات. وهذه الجينات، فى حقيقة الأمر، هى قطع ليجو بيولوجية جاهزة للأخذ والاستخدام. والمقدرة على إضافة لبنات بناء بيولوجية جديدة إلى الصندوق يضيف إلى كل من متعة «أى جم» وفوائد السجل. ولتثبيت القياس فى الأذهان يحتفى منظمو «أى جم»بالفائزين بالجائزة الكبرى بمنحهم كأسًا على شكل قطعة ليجو عملاقة مصنوعة من الألومنيوم.

غير أن الأمر يحتاج من مسابقة «أى جم» لكى تصبح تحديًا للبنات بناء البيولوجيا الذى تخيلناه فى مطلع هذا الفصل، إلى بذل جهود هائلة فى سبيل تطوير لا مجرد القطع فحسب وإنما أيضًا الأدوات التى تحدد صفات تلك القطع ثم تُجَمِّعُها فى دارات عاملة. وليس هذا بمشروع ينتهى فى صيف.

وتجرى مسابقة «أى جم» بين طلاب الجامعات، مما يشكل سببًا آخر للتركيز على القطع وليس على أدوات جديدة. فابتكار أدوات جديدة قد يكون أمرًا بالغ الصعوبة ويستغرق وقتًا، بينما المطلوب من الطلبة فى مسابقة «أى جم» أن يخرجوا بشىء يعمل فى ما لا يزيد على بضعة أشهر. وهناك فى الوقت الحاضر من الأدوات القادرة على التعامل مع قطع لبنات بناء البيولوجيا وتجميعها فى تجميعات مثيرة. غير أن قدرات

تلك الأنظمة الجديدة ستكون محدودة دون توفر أوصاف تفصيلية دقيقة للسمات الفيزيائية للقطع ، وكذلك وسائل جديدة لتحليل ونمذجة الأنظمة التخليقية المعقدة، بل وأدوات أكثر كفاءة لقراءة وكتابة الجينومات. وهذا هو الدرس المستفاد من دراسة تواريخ التكنولوجيات الأخرى.

مسار التكنولوجيا

تكشف المسارات التطورية للتكنولوجيات الحديثة عن اتجاهات مشتركة. ويمكن تعميم هذه الاتجاهات بمقارنة أمثلة على تطور التكنولوجيا . ومن الممكن عندئذ تصنيف هذه الاتجاهات إلى مراحل تحددها القدرات على التنبؤ الكَمى بسلوكيات المنتجات البشرية، أو الافتقاد إلى تلك القدرات. وعند تطبيقها على تقنية جديدة نسبيًا أو غير ناضجة مثل البيولوجيا ، فإن هذا التحليل يمكن أن يلقى الضوء على «ما الذى علينا فعله» لكى نطور البنية التحتية للتوصل إلى فوائد اقتصادية واجتماعية. وكما سوف أصف لاحقًا ، فإن مقارنة تطور تقنيات متعددة يوحى بأن الاستثمار فى قدرات معينة له نتائج يمكن التنبؤ بها .

وعلى الصفحات القليلة القادمة سأقدم «خط التكنولوجيا» بوصفه أداة جديدة لفهم تقدم التقنيات لا باعتبارها دالة تخضع للزمن أو المكان وإنما كتعبير عن الكفاءة - وعلى وجه الخصوص كفاءة التصميم والبناء، واختبار كفاءة الأشياء ذات القيمة والفوائد المادية. وبمعنى آخر، خط للتكنولوجيا يسهم فى إيضاح التباين بين الكفاءات الحالية لتقنية جديدة تحتاج مزيداً من الأبحاث. وبهذا فإن خط التكنولوجيا يفيد كمرشد إلى مستقبل أية تكنولوجيا .

خلف التكنولوجيا التى نعتبرها أمرًا مفروغًا منه ثمة أدوات خاصة بالتصميم والبناء واختبار المنتجات. وتتحكم تلك البنية التحتية فى الانتقال من أفكار ذات قيمة كامنة إلى أشياء تعمل على أرض الواقع. ويشكل فهم أهمية الأدوات إطارًا لبحث

موضوعات متنوعة تتناول تطور التكنولوجيا البيولوجية. وعلى سبيل المثال، ما الذى يحتاجه الأمر للبناء أو للابتكار كى تصبح التكنولوجيا البيولوجية مماثلة للطيران، وهى مثال بالغ النجاح لتطور التكنولوجيا الحديثة؟

والسرد التالى مستمد فى المقام الأول من فحص تاريخ الحاسبات والطائرات. ولقد تطور الطيران، كما نعرفه اليوم، منذ نحو قرن وصار نموذجًا أصليًا لتطور التكنولوجيا.

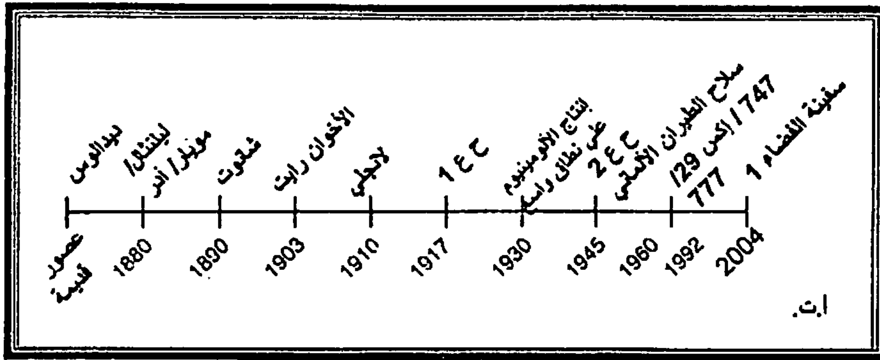
يمثل الشكل (٥-١) الشخصيات والأحداث المهمة فى تاريخ الطيران. ومقياس الزمن ليس خطيًا (أى ليس وفقًا لمقياس الرسم). وعلى الرغم من أن مقياس الزمن فى الشكل (٥-١) يعطى وسيلة للحكم على الزمن الذى استغرقته المراحل المختلفة لتطور الطيران بالذات، فإن تعميم تعاقب الأمور غير ممكن بدون تحديد النقلات المهمة بين التجارب والتصميم والبناء. وتتيح إزالة التواريخ كليةً، كما فى الشكل (٥-٢)، المقارنة بين التكنولوجيات المختلفة عن طريق التفكير فى الاختراعات والتطور بصورة أكثر عمومية.

والاستعاضة بخط الزمن باعتاره بديلاً لخط التكنولوجيا هو وسيلة للاطلاع على تغيرات التكنولوجيا. وهو رسم كاريكاتورى آخر غير خطى - وهو نموذج للغة الطبيعية - يمثل كيفية تطور الحكايات عن التكنولوجيا بمرور الزمن. وتعكس هذه الحكايات فهمنا الحالى للعالم أو فهمنا لشىء نقوم ببنائه. وتنطلق الحكايات مكتوبة بلغة طبيعية، أى بطريقة سردية. ثم تحل محل اللغة الطبيعية أوصاف تجريبية منبنية على بيانات كَمية وتجريبية. وهذه بدورها تزيحها جانبًا نظريات نشأت باستخدام رياضيات وفيزياء معاصرتين، وأخيرًا ينتهى الأمر بأدوات تصميم مبنية على نماذج تنبؤية، وتستخدم فى عمليات مباشرة من التصميم إلى البناء. وتصف المرحلة الأخيرة التصميم ومراحل التصنيع الحاليين فى مجالات الطيران والحاسبات، وتكشف المقارنة إلى أى مدى يتعين على البيولوجيا أن تمضى. ويتسم تسلسل الحكايات فى كل مرحلة بظهور أدوات تتيح معالجة المواد موضع البحث، والتى قد تكون ذرات أو كِسرات. وبهذا يكون خط

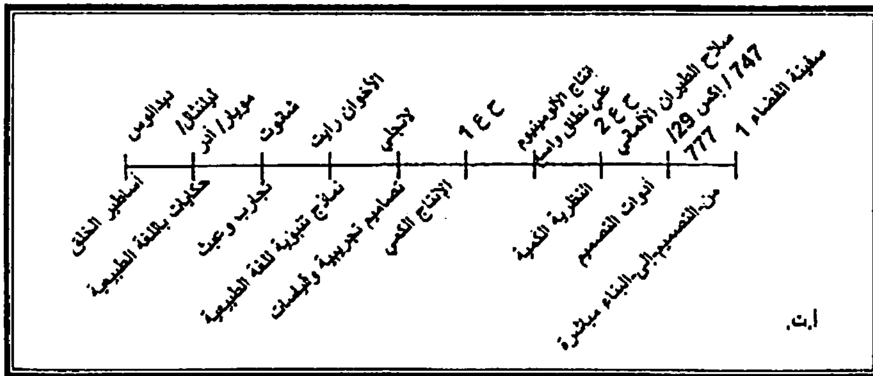
التكنولوجيا مقياساً للتكنولوجيا المبنية على التقدم تجاه تنفيذ بنية تحتية من التصميم إلى البناء، بمعنى أنها أوج المشروع المسمى الهندسة.

وتقدم تقنيات الحاسبات والاتصالات هو مثال توضيحى آخر يمكن وضعه فى رسم بيانى مع خط التكنولوجيا (انظر الشكل ٥-٣). والخط الزمنى للأحداث الفارقة فى تاريخ الحاسبات أطول من خط الزمن الخاص بالطيران بمئات السنين. غير أن التحول من لحظة ظهور التروس المسننة التى سمحت بالانتقال من التصميم التجاربى والاختبارات التجاربية والقياسات إلى عالم التصميم، البناء لم يستغرق سوى ما يقرب من أربعين سنة فى كل حالة. وليس فى ذلك ما يثير التعجب العميق: فالعديد من التطورات فى الحاسبات كان الدافع إليها متطلبات الدفاع فى الفضاء أثناء الحرب الباردة. ونعود إلى موضوع التكنولوجيا البيولوجية، فنقول إننا نستطيع أن نرى أنه مثلما كانت القدرة على محاكاة سلوكيات الأنظمة المعقدة أمراً جوهرياً لكل من الحاسبات والطيران، فمن المرجح أنها من المتطلبات الأساسية لبناءٍ ناجحٍ لأنظمة بيولوجية معقدة.

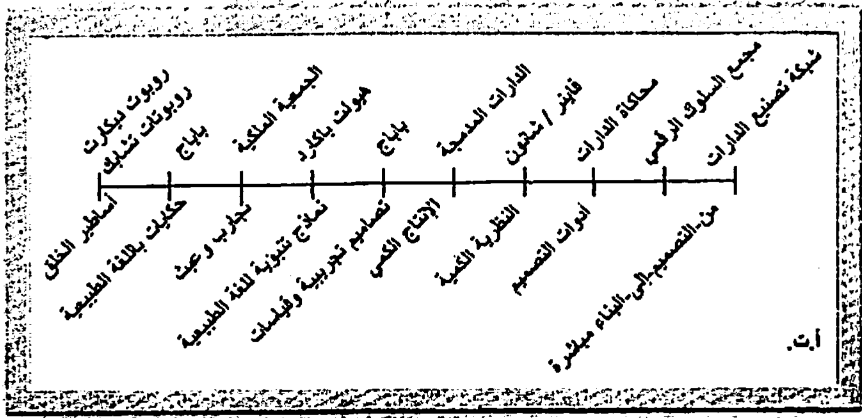
والمسار التكنولوجى مصمم لبناء مقارنات بين المسارات التطورية للتكنولوجيات البشرية، ولكى توضح الفروق بينها. وإذا نظرنا خلفنا فى الزمن نجد أن هذه الإستراتيجية تفرض بنية بأثر رجعى على عملية مليئة بالضرورة بالمنحنيات والمنعطفات. وكما يذكر سكوت بركون فى كتابه «أساطير الابتكار» "الأخطاء فى كل مكان، مما يجعل الخط المستقيم للابتكار هو نفسه نوعًا من الابتكار"[٢]، ويضاف إلى ذلك أن ثمة أحداثًا على مسار بعض الخطوط لا تتكرر فى خطوط أخرى أو تبدو بصورة مغايرة. وعلى الرغم من ذلك، هناك تشابهات واضحة بين التحولات فى هندسة الحاسبات والطيران. ويوضح تجميع مسارات التكنولوجيا نوع التكنولوجيا التى تظهر عند التحول بين أنواع الحكايات. وبشرح تفاصيل الابتكارات ذات الأهمية الخاصة، فإن تصنيف مسارات التكنولوجيا بالتالى يحدد ما المطلوب ابتكاره فى تطوير تكنولوجيات فجة غير ناضجة مثل البيولوجيا.



شكل (٥-١) المسار الزمنى (ليس وفقًا لمقياس الرسم) للشخصيات والأحداث المهمة فى تاريخ الطيران. انظر الفصل الرابع)



شكل (٥-٢) مسار تكنولوجيا الطيران، بعد وضع مراحل تطور التكنولوجيا مكان تواريخها.



شكل (٥-٣) مسار تكنولوجيا الحاسبات لا يمثل تمامًا ترتيب الأحداث؛ فبعض التحولات غير مرتبة زمنيًا. وعلى النقيض من تكنولوجيا الطيران، ظهرت النظرية الكَمية والتصميم فى الحاسبات قبل ظهور الإنتاج الجُملى (mass production) للدارات المدمجة. غير أن ثمة تقدمًا عامًا فى التعقيد والقدرات من اليسار إلى اليمين. ويضاف إلى ذلك أن هناك عناصر إلى اليسار هى شروط أساسية بالنسبة لعناصر إلى اليمين.

والملخص القصير الذى أوضحناه فى الفصول الأولى من هذا الكتاب هو؛ إن مجتمع العلماء والمهندسين العاملين على بناء أنظمة بيولوجية لا يزال الطريق أمامهم طويلاً. وإذا ما قارنا خط التكنولوجيا للبيولوجيا بالخطوط المماثلة للطيران والحواسب (شكل ٥-٤) فإنه يتضح لنا أن التكنولوجيات البيولوجية ذات باع طويل فى الرتق وبدايات التصاميم التجريبية، بينما الأمر يحتاج إلى المزيد من المجهودات الهائلة فى سبيل تطوير أدوات تصميم وتنفيذ البنية التحتية المباشرة من التصميم إلى البناء. وتشير المقدرات المحدودة الحالية فى السيطرة على الأنظمة المعدلة جينيًا أن التقنيات البيولوجية أقرب إلى الطائرة الشراعية التى صنعها أوتو ليلنتال منها إلى طائرة الأخوان رايت.

ولكى نزيد الأمر وضوحًا، لا أدعى أية ادعاءات خاصة بالتنبؤ بتفاصيل تطور التكنولوجيا ولا بالمقياس الزمنى الذى يسير التطور بمقتضاه. غير أن ثمة قدرات تصاميمية وتصنيعية مهمة تميز الكيفية التى بها تتحرك التقنيات من الأحلام إلى

الحكايات الوصفية، فإلى أشياء تعمل وفقًا لمواصفات محددة، وهى تزداد تعقيداً فى كل خطوة تخطوها فى تحولها إلى منتجات تسهم فى مجتمعنا واقتصادنا.

مراحل التطور	تكنولوجيا الطيران	تكنولوجيا الحاسبات	تكنولوجيا البيولوجيا
التصميم-إلى- البناء مباشرة	سفينة الفضاء ١	مجمع السلوك الرقمى	لقاحات فورية وقود حيوى فورى
أوات التصميم	٧٧٧ و ٧٤٧	نماذج الأجهزة شبكات تصنيع الدارات	العلاج بالجينات لبنات البناء البيولوجى
النظرية الكمية	ح ع٢/ سلاح الطيران الألمانى	شبكات تصنيع الدارات	البيولوجيا التخليقية
الإنتاج الجُملى	تصنيع الألومنيوم وتنقيته على نطاق واسع	محاكاة الدارات	منازل تصنيع الدنا
التصميم التجاربى	ح ع ١	تصنيع الدارات المدمجة	السلسلة - الدنا الرسول
تصاميم تجريبية وقياسات	الأخوان رايت لا نجلى	الترانزستور هيولت باكارد	كريك /واتسون
نماذج تنبوية باللغة الطبيعية	الأخوان رايت	شانون إنياك فون نيومان فاينر	ثورة كمبريدج مندل
أساطير الخلق	ديدالوس	روبوت ديكارت	الخلق

شكل (٥-٤) مقارنة مسارات التكنولوجيا للطيران والحاسبات والبيولوجيا

ولما كان خط التكنولوجيا هو فى حد ذاته نموذج للغة طبيعية تصف عملية تطور التكنولوجيا، فالأمر الجدير بالاهتمام هو أن نتساءل عما إذا كان سيوجد فى المستقبل نموذج كَمى وتنبؤى لتطور التكنولوجيا. ولما كان ذلك يستلزم القدرة على التنبؤ بظهور شخصيات محددة وصدامات بين إيديولوجيات تنتهى بصراعات، وحتى بظهور فيزياء جديدة، فإن لدى شكوكًا حول نشأة مثل ذلك التاريخ المستقبلى. وليس من الواضح إمكانية ظهور توصيف موحد للابتكارات أو لتطور التكنولوجيا. وتظهر التكنولوجيات التخصصية فى إطار التاريخ والضغوط الاجتماعية والاقتصادية والسياسية المختلفة وقتها.

ويمكن تعريف بيئة اليوم بأنها تتسم بالانتقال السريع للأفكار، والمحاكاة السريعة لتلك الأفكار باستخدام البرمجيات، وأخيرًا التصنيع السريع للأشياء. ونظرًا لأننا نملك خبرات بضع مئات من السنين فى تكنولوجيات جديدة فى إطار الثورة الصناعية وثورة تكنولوجيا المعلومات، فإن بمقدورنا على الأقل أن نقرر من واقع تجربتنا شيئًا عن الوقت اللازم لنشأة بنية تحتية «من-التصميم-إلى-البناء» لأية تقنية، وكم من الوقت يحتاج الأمر لتكنولوجيا لكى يتم تبنيها على نطاق واسع، وكم من الوقت بصورة عامة يستغرقه تحقيق القيمة الاقتصادية الناتجة عنها.

تركيبة الثورات التكنولوجية الحديثة

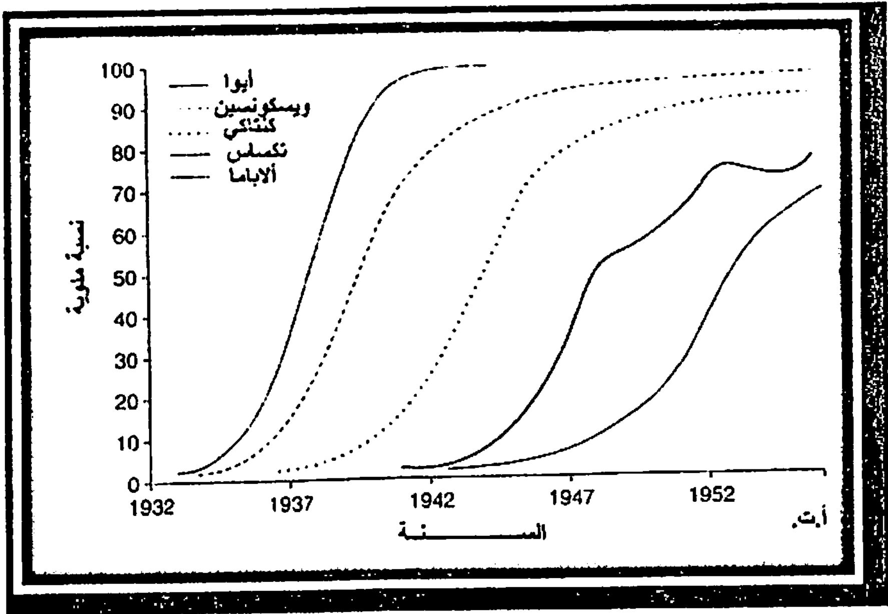
يبدو أن ذروة الخطوات فى خط التكنولوجيا هى إنجاز بنية تحتية تتيح إجراء «من - التصميم -إلى- البناء». ويتم تصميم القطع بالاستعانة بالحاسب (كاد) (computer-aided design, CAD) باستخدام نماذج هندسية معقدة مبنية على معطيات العالم الحقيقى، ثم يتم إنتاجها فى ورشة تصنيع، عادة تستخدم آلات تساعدها الحاسبات (كام) (computer-aided manufacturing, CAM)، ثم تُشحن إلى المصمم خلال أيام أو ساعات. وموضوع «من-التصميم-إلى-البناء» ليس جزءًا من قصة عامة

تتناول التطور التكنولوجى، وإنما هى قصة تقتصر فى المقام الأول على مخترعات ما بعد القرن التاسع عشر. ولقد حدث تغير أساسى أثناء القرن العشرين: وهى أن القدرة على محاكاة أداء شىء ما، بلغت مبلغًا من القوة يتيح لها أن تتنبأ بسلوكيات الشىء قبل أن يُبنى. وصار من الممكن الاستغناء عن الكِسرات والذرات، وهو استغناء بالمعنى المادى والاقتصادى، بحيث يمكن إحلال التوصيفات الحاسوبية للأشياء محل الأشياء نفسها فى أغراض التصميم والاختبار، فى الوقت الذى تتزايد فيه مبيعات تلك التصاميم مع إدراك أنها يمكن التأكد منها بواسطة أى شخص بما لا يدع مجالاً للشك بواسطة الأدوات المناسبة التى تساعدها الحاسبات.

كما أن بإمكان القدرات على الاستخلاص والمحاكاة أيضًا أن تسهل استكشاف تصاميم جديدة. ومن الأهمية بمكان أن نذكر أن انتشار القطع القابلة للتشكيل يتيح مقدرات مترتبة عليها على تجميع تلك القطع فى أشكال جديدة. وبمجرد أن تتمكن أنت من وصل عناصر ذات توظيفات مختلفة تبدأ أعداد التجميعات الاحتمالية فى النمو بصورة مثيرة. وتتحول الأجهزة الناتجة من تلك التجميعات إلى عناصر مكونةٌ تسلسلات هرمية (متكررة) من المنافع. وهذه الوفرة من التوظيفات هى ما يمكن أن يؤدى إلى أعظم التأثيرات الاقتصادية. غير أن مجرد إتاحة وجود التوظيفات الجديدة لا يعنى استخدامها الفورى فى الاقتصاد.

وضع جيمس نيوكومب، ميلى والمؤلف المشارك فى «رابطة البحث البيولوجى الاقتصادى»، وضع ترتيبًا للإطار فى كتاب «مستقبل تخليق الجينوم وتصميمه: الآثار المترتبة على اقتصاد الولايات المتحدة» والذى صدر تحت رعاية وزارة الطاقة الأمريكية، وضع الترتيب على النحو التالى:

> إذا نظرنا نظرة متفحصة للتطورات الراهنة نستطيع أن نوجه عدة أسئلة محورية:
>
> - ما المغزى الاقتصادى المحتمل للتوجه الهندسى للبيولوجيا؟
>
> - ما سمات ثورة الهندسة البيولوجية البازغة؟

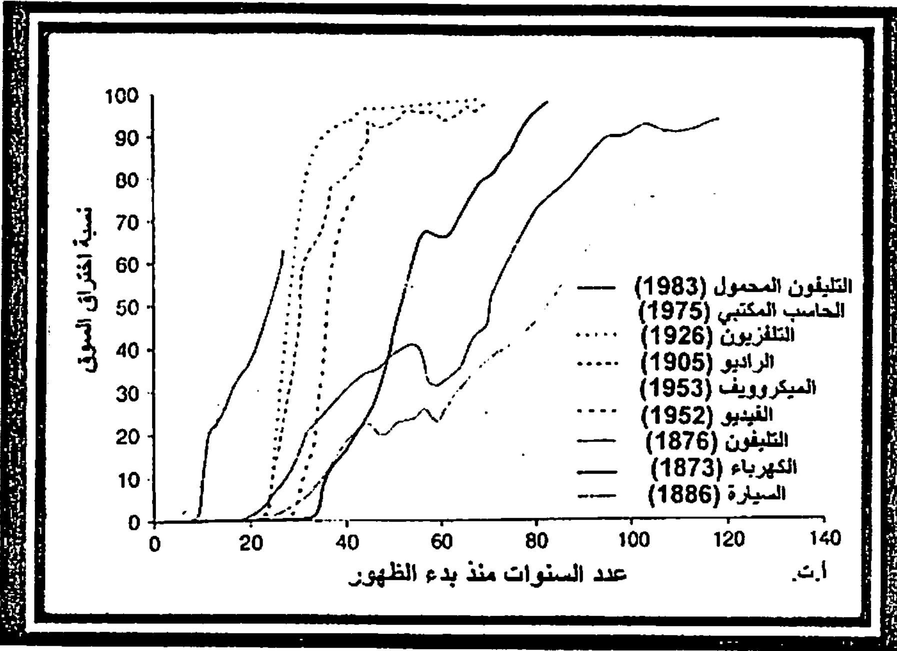


شكل (٥-٥) معدلات دخول الذرة الهجين فى الولايات المتحدة.

فى كل مكان نتطلع إليه نجد أن التكنولوجيا تتسم بنمط تكرارى: وهو أن التكنولوجيات تتبنى من قطع موجودة بالفعل. وهذه القطع بدورها تتكون من تجميعات مشابهة لقطع أصغر، وهو نمط يكرر نفسه عبر خمس أو ست طبقات. ويلاحظ و. بريان آرثر، وهو اقتصادى ومفكر فى التكنولوجيا فى معهد سانتافيه، أن "التكنولوجيا تشكل شبكة من عناصر يمكن أن تُبنى منها عناصر جديدة. وبمرور الوقت، تنبنى هذه الشبكة دون مساعدة من أحد من عناصر بسيطة إلى عناصر أشد تعقيدًا ومن بضعة عناصر لبنات بناء إلى العديد منها".

وبالسماح بالابتكارية من خلال تجميع مجال واسع من المكونات والوحدات البيولوجية يمكن للبيولوجيا التخليقية أن تغير تغييرًا جذريًا مشهد الابتكارات البيوتكنولوجية. ومن الممكن إقامة الدليل بالفعل على قوة الابتكار بواسطة تجميع مكونات موجودة فى

مجالات تكنولوجية على شاكلة الكيمياء التوافيقية (combinatorial chemistry) والإلكترونيات والبرمجيات، حيث بُنيت عقود من الابتكارات على تطورات سابقة . ومثل تلك الأنظمة، التى تتبنى الابتكارات الغزيرة من خلال التجميع ليست فنية فحسب وإنما لها شروط مسبقة تشمل أُطُرًا اقتصادية واجتماعية وتنظيمية تحدد مدى ملاءمة القيمة بواسطة المخترعين وأنظمة الخواص الذهنية التى تدعم التراكم الخلاق للاختراعات على مر الزمن(٤).



شكل (٥-٦) إن انتشار التكنولوجيا قد يستغرق عقودًا (كما يقيسها التغلغل فى الأسواق). البيانات المقدمة لا تتعدى سنة ١٩٩٧ . المصدر: ب. بريملوف «الازدهار الصامت»، إصدار فوربس، ٧ يوليو ١٩٩٧.

ليست الثورات التكنولوجية مجرد الأدوات والوسائل والمقدرة على إنتاج شىء له وظائف محددة. ولكى تتحقق الفائدة، سواء من ابتكار فى الرعاية الصحية أو إنتاج

الطعام أو تصنيع أشياء بل حتى من لعبة أطفال بسيطة، يتعين على الناس أن يكونوا مستعدين لاستيعاب تلك الابتكارات والحصول عليها واستخدامها.

ولقد كان الاستخدام التدريجي للذرة الهجين من المزارعين فى الولايات المتحدة مثالاً لتبنى التكنولوجيا، وكانت له نتائج مؤثرة على إنتاج الطعام وتكوين الثروات فى الفترة ما بين أوائل القرن العشرين إلى منتصفه. وينتج التهجين من خلال التربية وليس عن طريق التعديلات الوراثية المباشرة. وعلى الرغم من أن المزارعين العاملين فى ولايات مختلفة كانت نفس المعلومات والتقنيات متاحة لهم بصورة عامة بدءًا من ثلاثينيات القرن العشرين فصاعداً، فإن أنواع الذرة الهجين تطورت واستُخدِمت بصورة مختلفة وبمعدلات متباينة، وفقًا لعوامل متعددة (شكل ٥-٥).

عمم مايكل داربى ولين زوكر، اللذان يبحثان فى شئون الاختراعات فى جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس، مثال الذرة الهجين بحيث يشمل ثورات التكنولوجيا بكل أنواعها. وهما يكتبان على نطاق واسع عن تكنولوجيا النانو وتكنولوجيا البيولوجيا ويلقيان الضوء على نجاح الذرة كنوع خاص من الابتكارات:

> **كان زفى جريليتش أول اقتصادى يدرس الاكتشافات التى حققت اختراقًا وتقدمًا مفاجئين والتى أطلق عليها "اختراع وسيلة الاختراعات". وكانت الذرة الهجين هى موضوع دراسته، "وهى وسيلة لتربية ذرة متفوق فى مناطق معينة. ولم يكن اختراعًا بسيطًا قابلاً للتكيف فى كل مكان". وقد لاحظ جريليتش أن مثل تلك الاختراقات تنطوى على عملية انتشار مزدوج: توقيت تطبيق وسيلة الاختراع على منتجات احتمالية معينة "التوفر" والسرعة التى تصل بها مبيعات كل منتج معين إلى مستوى النضج "التقبل". ويربط جريليتش سرعة العمليتين إلى مدى الربحية الناتجة منها[٥].**

وضع جريليتش، ومن بعده داربى وزوكر، أهمية قصوى على ربحية وسيلة الاختراع فى حالة الذرة. كما كان تحديد السلالات المرغوبة أمرًا على جانب كبير من

الأهمية، وكذلك على التعامل التنبؤى معها، ورغبة المزارعين فى مقايضة النقود والسيطرة على المعلومات مقابل تحسين الإنتاجية[٦]، وقد أسهمت كل تلك العوامل فى مرور عقود عديدة من السنين استغرقتها الذرة الهجين كى تصل إلى مستوى مرتفع من الاستخدام.

ولقد بان بطء انتشار تقبل تقنيات جديدة كثيرًا على مر القرون العديدة الأخيرة. فبعد ابتكار المحركات الكهربية استغرقت ما يقرب من عقدين لكى تخترق الصناعة الأمريكية وتصل إلى ٥ بالمائة وعقدين آخرين لتصبح ٥٠ بالمائة (انظر شكل ٥-٦)[٧]، غير أن ثمة دليلاً فكاهيًا يشير أن تبنى التكنولوجيات ربما يكون متسارعًا، كما لاحظ نيوكوم وكارلسون وألدريتش أن: "انخفضت أسعار الكهرباء والسيارات إلى العُشر على مدى نحو سبعة عقود بعد اختراعها. بينما انخفضت أسعار الحاسبات بضعف تلك السرعة فقد انخفضت إلى العُشر فى ٣٥ سنة"[٨].

وبغض النظر عن مقياس الزمن، نجد أن التكنولوجيا التى تقدم وسائل جوهرية جديدة لتقديم خدمات أو سلع تنزع إلى الظهور فجأة داخل أُطُرٍ حددتها الثورات السابقة. ويمكن للتفاعلات بين الجديد والقديم أن تخرج بديناميكيات غير متوقعة، وهو موضوع سوف أعود إليه فى الفصل الأخير. والشىء الأكثر أهمية هنا بصورة مباشرة هو أن بحث أى تكنولوجيا قد لا يتيح قرائن كافية حول المعدلات المحتملة لاختراق السوق. فمثلاً عندما اختُرِع الجهاز العارض لشرائط الفيديو (VCR) سنة ١٩٥٢، بقى تبنيه فى أدنى مستوياته لعدة عقود. ثم حدث فى أواخر سبعينيات القرن العشرين أن نسبة ملكيته بلغت عنان السماء. ولم يكن سر ذلك التغير؛ أن المستهلكين قرروا فجأة أن يقضوا وقتًا أطول أمام جهاز التليفزيون ولكن بسبب أن مكونًا رئيسيًا من مكونات الجهاز، وهى الدوائر المدمجة والتى لم يزد عمرها آنذاك على بضعة عقود، بدأت أسعارها فى انخفاض مذهل. وأسهم نفس هذا الحراك الديناميكى للأسعار فى الدفع بدور الدوائر المدمجة إلى خلفية إدراكنا، وصارت هذه التكنولوجيا الآن تعمل باعتبارها

أساسًا لتكنولوجيات مستقلة أخرى، تتراوح ما بين الهواتف المحمولة إلى الحواسب إلى أجهزة وسائل الإعلام.

وبالمثل، نجد أن تداخل تقنيتين جديدتين على الهندسة البيولوجية تغير تمامًا من الطريقة التى تُبنى بها الدوائر الجينية التخليقية مما ينتهى بها فى نهاية المطاف إلى تغيير بناء الكائنات الجديدة. ويؤدى خلق مكتبة من القطع الوراثية القابلة للتشكيل لها وظائف رياضياتية مجردة يمكن نمذجتها بواسطة برمجيات، مع المقدرة على تحويل التمثيلات الإلكترونية للدوائر إلى جزيئات عن طريق التخليق الكيماوى للدنا، يؤدى أن كليهما معًا يتيحان بناءً جديدًا للمسارات التى تفضى خلال أسابيع إلى إنتاج منتجات ذات قيمة اقتصادية واجتماعية. ويشكل هذا المنهج مثالاً للإطار الذى حددته ثورات سابقة، وهو تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، وهو إطار يتيح القدرة على نمذجة سلوكيات الدوائر الجديدة، وإفراز مواصفات إلكترونية يمكن إعادتها بسرعة عن طريق البريد السريع. ويغير تبنى قطع محددة الصفات ولها وظائف محددة، يغير بصورة مثيرة من طريقة تفكير المهندسين الخاصة ببناء أنظمة اصطناعية، والقدرات البازغة لتبادل المادة (الذرات) والمعلومات (الكِسرات)، خلال بضعة أيام، مما سوف يجعل مشروع الهندسة البيولوجية يعمل برمته داخل إطار الاقتصاد.

تبادلية المعلومات الفيزيائية

الكِسرات والذرات على درجة من التبادلية فى بعض مجالات التصميم والتصنيع، بحيث إن الماسحات الضوئية ثلاثية الأبعاد تُستَخدم فى تحويل الأشياء إلى معلومات رقمية. ويفضل بعض مصممى السيارات أن ينحتوا يدويًا شكلاً جديداً ممشوقًا من الصلصال بدلاً من إجراء العملية على الحاسب. ثم يتم إجراء قياس دقيق لحجم وشكل كتلة الصلصال بواسطة نظام آلى يتولد عنه ملف تصميم إلكترونى: أى من ذرات إلى كِسرات.

كما استغل المتعاملون مع القطع البيولوجية أيضًا الاتجاه «ذرات-إلى-كِسرات» بصورة عامة. وحرفيًا صار التقاط صورٍ للجزيئات والعمليات أمرًا طبيعيًا الآن، ثم يوَصِّفون هذه المعطيات بنماذج متفاوتة فى تعقيداتها، ويطرحونها للمناقشة والجدل على أمل فهمها واستيعابها. ولم يحدث إلا أخيرًا أن تقنيات البيولوجيا أتاحت تنفيذًا سهلاً للانتقال من الكِسرات إلى الذرات، تتحول فيه المعلومات الإلكترونية إلى قطع مادية من الدنا التى تصنع جينات وكائنات جديدة.

وتنشأ التقنيات البيولوجية ذات الأهمية وتتحسن بسرعة تجعل من المتعذر إدراك مدى تغير إمكاناتنا. ويبين خط التكنولوجيا فى الشكل (٥-٤) الفرص المتاحة للاستثمار فى البنية التحتية الرئيسية للهندسة البيولوجية، والتى تؤثر عمليًا فى كل مجالات الاقتصاد البشرى والصناعة. ويضاف إلى ذلك أن خط التكنولوجيا يضع التقدم فى البيولوجيا فى إطار عريض يمكن أن يُستكمل بتفحص التغيرات الخاصة فى التكاليف والإنتاجية. وتقدير سرعة التحسن فى التقنيات الممثَّلة هو إحدى الوسائل لتبيان المعدل الذى تتغير به قدراتنا على التفاعل والتعامل مع الأنظمة البيولوجية. وسوف أتناول فى الفصل التالى من هذا الكتاب سرعة التحسن التى تكمن بين ثنايا الاحتمالات المتفجرة للآمال والأخطار ونحن "نتعلم الطيران".

الفصل السادس

سرعة تغير التقنيات البيولوجية

كل ما أتمناه كهدية لعيد ميلادى هو «صندوق معدات استكشاف الدنا» الذى تبيعه قناة ديسكفرى![1]. ومع وجود جهاز طرد مركزى من البلاستيك غنى بالألوان وبضع زجاجات مواد كيماوية بسيطة وبطاقة مدون عليها سعر ٧٩,٩٥ دولار، يستطيع أى شخص أن يبدأ فى التلاعب بالدنا الموجود فى أى جرثومة متاحة. ثم تكفى رحلة سريعة عبر الإنترنت للحصول على الإنزيمات والمواد الكاشفة لقطع وإلصاق الأحماض النووية وإكثارها. ويستطيع الأطفال الآن أن يلعبوا بالدنا فى حجرات نومهم، ولا ريب فى أن القرصنة الإلكترونية سوف تفعل ذلك سريعًا. ويستطيع من يتوقون حقًا إلى ممارسة القرصنة واختراق الدنا أن يفعلوا ذلك بأن يشتروا بالبريد صناديق المعدات التى تُستخدم كثيراً فى المعامل الأكاديمية والصناعية وجمع المعلومات من الإنترنت. وليست ثمة ألغاز فى استخلاص الدنا من جرثومة ودمجها فى جرثومة أخرى. والنجاح يستلزم ببساطة رغبة فى الاستمرار فى المحاولة حتى تنجح، رغم أن جعل الدنا يتصرف كما نود فى بيئته الجديدة، كما شاهدنا، ما زال أمراً محفوفًا بالمشاكل. وعلى الرغم من ذلك، فالعمليات الرئيسية التى يحتاجها نقل الدنا من كائن لآخر (ويشار إليها أحيانًا بمصطلح «سحق الدنا»، وهو مصطلح يشى بالنظرة التى تنظر بها الدوائر المعملية إلى هذه التقنية) أصبحت الآن جزءًا حقيقيًا من المعلومات العامة. ولقد تحول جانب كبير من الأعمال الروتينية الأساسية فى معامل البيولوجيا الجزيئية إلى وصفات يستطيع أى فرد أن ينفذها.

والدرس المستفاد هو أن ظهور المعمل المنزلى للبيولوجيا الجزيئية ليس بعيداً. والبنية التحتية الفيزيائية اللازمة للتعامل مع البيولوجيا الجزيئية تزداد تعقيداً وانخفاضًا فى السعر كل يوم. واليوم نجد أجهزة آلية ومتاحة تجاريًا تتعامل مع جانب متعاظم من الأعمال المعملية كانت فيما مضى مجالاً يتفرد به حملة درجة الدكتوراه من الباحثين، وبذلك انخفضت تكاليف العمالة وارتفعت الإنتاجية. وهذه التقنيات تدلف تدريجيًا إلى السوق العريضة مع ترقى المعامل إلى التجهيزات الجديدة. أما التجهيزات المستعملة والتى لا تزال أدوات بالغة القوة فتجد طريقها إلى التوزيع العريض، كما يثبت ذلك أى تصفح لمواقع إى - باى (EBay) أو أى مواقع تصفية على الشبكة العنكبوتية. وبمقدور أى شخص أن يجهز بسهولة معملاً ويجعله صالحًا للعمل بما لا يتجاوز ٥٠٠٠ دولار بأدوات كانت تكلفه عشرة أضعاف ذلك المبلغ على الأقل منذ بضع سنوات.

وسرعان ما سيضع انتشار بروتوكولات العمل وأجهزته أدوات فائقة القدرات فى أيدى المحترفين والهواة فى أنحاء العالم. وأهم من ذلك أن التقدم العام فى التقنيات المستخدمة فى قياس الجزيئات والتعامل معها سوف يتيح سريعًا تعاظمًا عريضًا ومنتشرًا فى المقدرة على تغيير الأنظمة البيولوجية. وتتسبب احتمالات الأخطاء الناتجة فى قلق مفهوم، وهناك بالفعل صيحات جماهيرية أطلقها علماء وسياسيون للحد من حرية الوصول إلى تقنيات بعينها، ولتنظيم توجهات البحث البيولوجى، ولفرض الرقابة على نشر بعض التقنيات والمعطيات الجديدة. غير أنه من المشكوك فيه أن مثل تلك الجهود سوف تؤدى فى الحقيقة إلى ازدياد الأمان أو إلى فائدة الجمهور. وعادة ما يؤدى حظر المعلومات والمنتجات البشرية إلى خلق سوق سوداء من العسير مراقبتها ومن ثم من الصعب المحافظة على الأمن فيها.

وسوف أجادل فى الفصول (٩-١٤) أن ثمة بديلاً أفضل من الحظر هو الإنشاء المتعمد لمجتمع بحثى منفتح وفسيح. وسيكون هذا المجتمع المفتوح أفضل فى قدرته على الاستجابة للأزمات، وأفضل فى تحديد مسارات البحث سواء فى الجامعة أو فى

المرآب (الجاراج). وأولاً يتعين علينا أن نفهم أوضاع التكنولوجيا والإمكانات التى تتيحها للذين يستخدمونها.

العوامل التى تدفع ثورة التكنولوجيا البيولوجية

كل يوم تظهر تقنيات جديدة تتيح ولوجًا أفضل إلى عالم الجزيئات. وهذه الأدوات تفعل ما هو أكثر من مجرد تحسين قدرات العلماء على جمع البيانات.

وبخلاف استخداماتها فى التجارب، نجد أن كل تقنية جديدة للقياس تخلق أسلوبًا جديدًا للتفاعل مع الأنظمة البيولوجية. ويضاف إلى ذلك، أن تقنيات القياس الجديدة تتحول بسرعة إلى وسائل للتعامل مع الأنظمة البيولوجية والتلاعب بها. وتظهر التقنيات الجديدة، وتتحسن بسرعة كبيرة تجعل من إدراك مدى تغيرات قدراتنا أمرًا عسيرًا. وتقدير سرعة التحسن فى التقنيات المعنية هو إحدى الوسائل التى تبين المعدل الذى تتقدم به قدراتنا على التعامل مع الأنظمة البيولوجية.

وليس من اليسير تقييم معدل التحسن للعديد من التقنيات تقييمًا كَميًا. ومما يسهل الجهد المبذول فى هذه السبيل قيام شركات الأجهزة بالإعلان عن كفاءة أجهزتها. وإضافة لذلك، نجد أن بعض الأبحاث المنشورة تصف بإسهاب مدى سرعة عمل تلك الأجهزة وتكاليف تشغيلها. ومن الأمور ذات الأهمية بوجه خاص حقيقة أن التلاعب بالدنا قد بات أمرًا ذائع الشيوع، بحيث صارت السرعة أمرًا حاسمًا فى عديد من التطبيقات. فمثلاً، يمكن استخدام فتات الدنا المخلقة كيماويًا، التى يُطلق عليها «وليجونيوكلوتيدات:oligonucleotides» يمكن استخدامها فى حسابات الدنا، وفى تصنيع صفوف فك شفرات الجينات (شظايا الجينات)، وفى خلق بُنَى (جمع بنية) أكبر بهدف التعامل مع الجينات. والدنا يُصنَّع لهذه الأغراض إما فى المعمل الذى سوف يُستَخدَمُ فيه أو فى أماكن أخرى تقتصر وظيفتها على ذلك على أن يتم التسليم بالبريد السريع. وقد استُخدِمت الأوليجونيوكلوتيدات المرسلة بالبريد السريع لأول مرة سنة

٢٠٠٢ لبناء جينوم فيروس فاعل لشلل الأطفال من مكونات جزيئية [٢]. ومنذ ذلك الحين، تم الإعلان عن بُنَى متزايدة الأطوال (شكل ٦-١)، وحديثًا تم تخليق كروموسوم جرثومى متكامل من أوليجونيوكلوتيدات قصيرة [٣]. والتوصل إلى دنا مخلق له طول الجينات هو أمر جوهرى لمسابقة آلات الهندسة الوراثية الدولية «آى جم»، كما سبق أن ناقشنا فى الفصل الخامس.

وتجميع الجينات والجينومات المخلقة أمر غير مستساغ تقنيًا، كما أنه فوق الطاقة من الناحية المالية إن لم يصاحبه تخليق على نطاق واسع للأوليجونيوكلوتيدات. كما أن الاحتياج إلى الدنا المخلق ينشأ بالإضافة إلى ذلك من الشركات التى تطور كواشف جديدة لأجهزة مقاومة الإرهاب البيولوجى، وللتشخيصات الطبية الجديدة، وللدارات الجينية الجديدة والجراثيم الجديدة لإنتاج المواد والوقود. وبهذا تكون السرعة التى تتغير بها المقدرة على تخليق الدنا مؤشرًا على تحسن قدراتنا على التعامل مع الأنظمة والمعلومات البيولوجية. ونجد الآن أن الزمن الذى يستغرقه تسليم البُنَى التخليقية هو خطوة تَحُدُّ من تطوير المنتجات فى بعض الشركات. وعلى ذلك، نجد أن قياس تحسن إنتاجية تخليق الدنا هو مؤشر مباشر للفائدة الاقتصادية. وبالمثل، نجد أن التحسن فى قراءة شفرة قطع الدنا الموجودة هى مقياس لقدراتنا على تجميع المعلومات البيولوجية فى تطبيقات متباينة. ولقد أصبح التتابع (السَلسَلَة) أداة أساسية الآن فى فهم صحة البشر وأمراضهم، فهى تكتشف الأخطار الجديدة سواء منها الطبيعية أو التخليقية، وتنقب عن قطع جديدة من الطبيعة، وتصحح الدارات والكائنات التخليقية.

سرعة التغيرات التكنولوجية فى إطار قانون مور

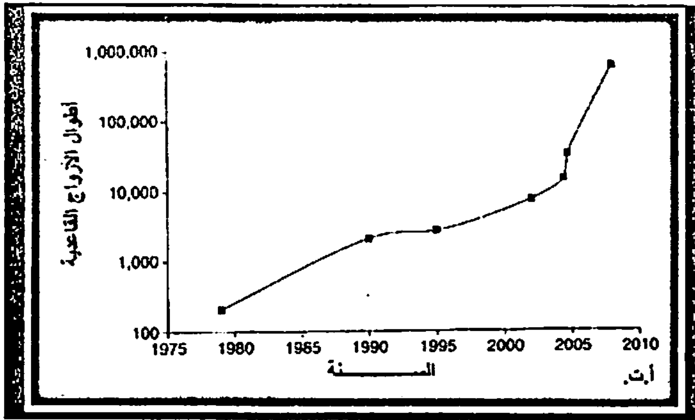
يتيح التطور التاريخى للدوائر المدمجة قياسًا استثنائيًا فى فوائده لما يحدث فى البيولوجيا. وفى الحق، نجد أن ثمة رهطًا من المهندسين يناضلون فى سبيل تكاثر تلك البُنَى التحتية فى البيولوجيا، والعديد من هؤلاء المهندسين بدأوا حياتهم

العملية تحت مظلة الثورة الحاسوبية التى أطلقتها المقدرة على صنع دوائر ميكروإلكترونية عالية الكثافة، ثم عملوا على انتشار أدوات التصميم وتصنيع كميات منها. غير أن ثمة تشابهات إضافية عميقة، وكذلك اختلافات، بين تلك المجالات تستحق الاستكشاف.

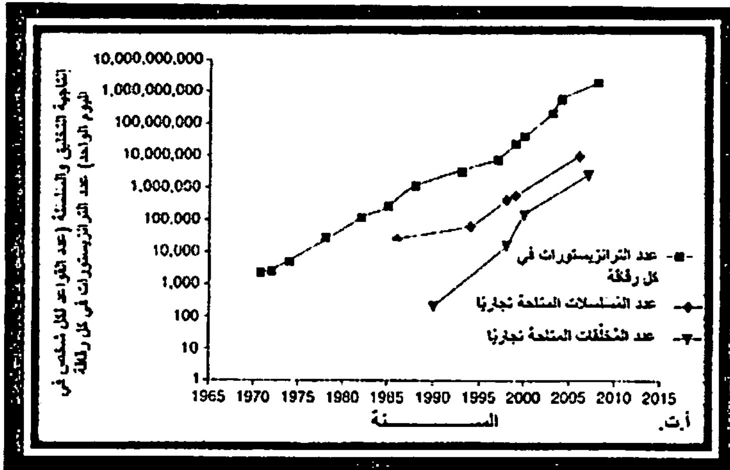
وأبسط وسيلة لقياس التقدم فى التكنولوجيات البيولوجية هى أن ترسم رسمًا بيانيًا للإنتاجية التى تسمح بها التجهيزات التجارية. ولما كان العديد من تلك التجهيزات مؤتمتة (آلية)، فمن الممكن لفرد واحد أن يتابع أكثر من جهاز فى ذات الوقت، وبهذا تتضخم قدرات هذا الفرد فى المعمل.

ويحوى شكل (٦-٢) تقديرات للإنتاج اليومى المحتمل لتخليق الدنا والسَلسَلة المبنية على الأجهزة المتاحة تجاريًا، بما فيها الوقت اللازم لتحضير العينات. ولم تظهر حتى الآن إلا بضعة أجيال من الأجهزة، والقصد من هذه التقديرات فى المقام الأول هو إدراك مغزى الاتجاهات. وعلى سبيل المقارنة، يظهر أيضًا على الشكل (٦-٢) عدد الترانزيستورات على الرقائق. ومنذ زمن بعيد يجرى قياس التحسن فى قوة الحوسبة بتتبع عدد الترانزيستورات التى يمكن تثبيتها على رقاقة واحدة. وتُعرَف الزيادة الأُسية فى عدد الترانزيستورات المرئية فى شكل (٦-٢) باسم «قانون مور»، الذى حدده كَميًا لأول مرة جوردون مور، أحد مؤسسى شركة إنتل، سنة ١٩٦٥ [٤]، ويبدو أن التحسن فى تخليق الدنا وتتابعاته يواكب قانون مور.

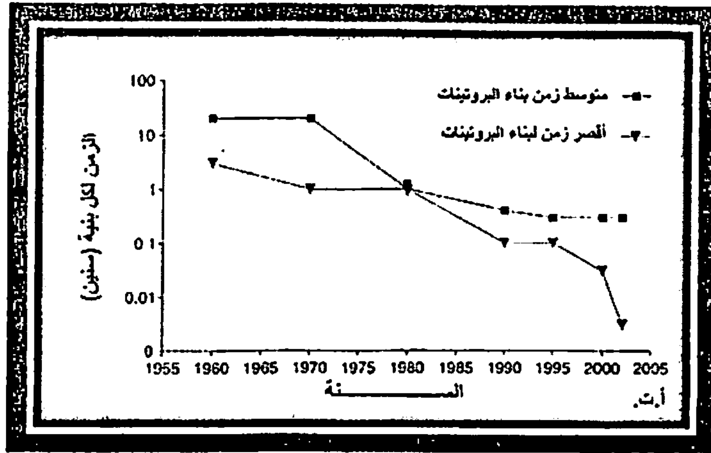
وتتجلى هذه الاتجاهات فى مناطق أخرى من البحوث البيولوجية. وقد حدثت فى عملية تحديد تراكيب البروتينات، التى تعتمد على تنوع من التقنيات ومجالات التخصصات، من التعديلات الجينية إلى الكيمياء إلى علم البللورات الإشعاعى إلى علوم الحوسبة، حدثت تحسينات مثيرة مماثلة فى الإنتاجية (انظر شكل ٦-٣، الذى يصور الزمن حتى الانتهاء وليس الإنتاجية). وهذا يعنى تحسنًا عامًا وسريعًا فى التكنولوجيات البيولوجية.



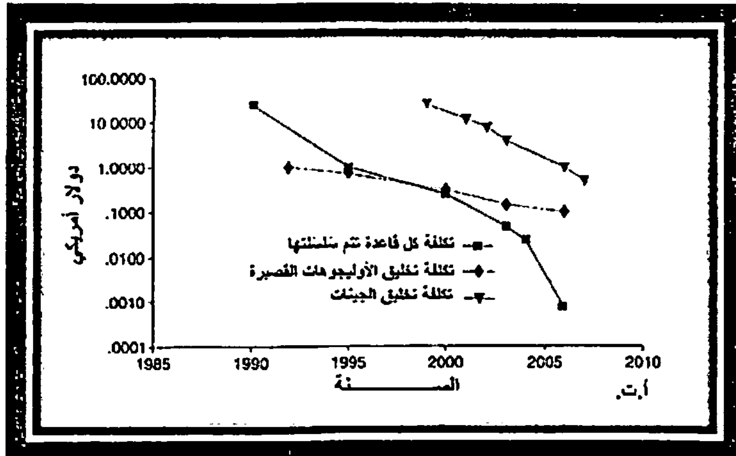
شكل (٦-١) أطول بُنى للدنا التخليقى تم نشرها



شكل (٦-٢) الإنتاجية فى تخليق الدنا وسَلسَلته. فى هذا الرسم البيانى الذى يمزج بين اللوغاريتمات والرياضيات، نجد أن إنتاجية تخليق الدنا وسلسلته اللتين تتيحانهما الأجهزة الموجودة تجاريًا ترتفع بنفس سرعة عدد الترانزيستورات فى كل رقاقة، وهو قياس بديل شائع للإنتاجية فى الاقتصاد الواسع. والإنتاجية تُعرَّف هنا بأنها كمية الدنا التى يمكن تصنيعها بواسطة فرد واحد يشرف على أجهزة عديدة ليوم واحد مكون من ثمانى ساعات عمل، كما يحددها الوقت اللازم لإعادة تنظيم العينات والتعامل معها بكل جهاز. ولا تشمل هذه التقديرات الوقت الذى يستغرقه تحليل السَلسَلة. وقد نُشرت هذه البيانات أصلاً فى كتاب «سرعة التكنولوجيات البيولوجية وانتشارها» تأليف ر. كارلسون، ١، رقم ٣ (٢٠٠٣): ٢٠٣-٢١٤، وأُضيفت إليها بيانات من صانعى أجهزة أكثر حداثة.



شكل (٦-٣) تقديرات الزمن اللازم لتحديد بنية البروتينات (عزل/إنتاج، وبلورة، وجمع البيانات وبناء النموذج). والانخفاض المثير فى الوقت اللازم لتحديد بنى البروتينات يشهد عليه الاتجاه العام لزيادة الإنتاجية فى التكنولوجيا البيولوجية. والعديد من التقنيات المستخدمة في التوصل إلى بنى البروتينات تستخدم على نطاق واسع فى البيولوجيا فى أغراض أخرى. وقد تم حساب أقصر زمن ومتوسط الزمن لتحديد بنى البروتينات من إحصائيات لخمسة معامل لبناء البلورات الإشعاعى («سرعة التكنولوجيات البيولوجية وانتشارها» تأليف ر. كارلسون، ١، رقم ٣ (٢٠٠٣): ٢٠٢-٢١٤). وقد يتغير الوقت اللازم لكل خطوة تغيراً جوهرياً، وفقاً للبروتين. فمثلاً، قد تستغرق بلورة ناجحة أى زمن ما بين ساعات إلى شهور من الجهد. والفرق بين تقديرات متوسط الزمن وأقصر زمن لبناء بنية بروتينية يوضح صعوبة التحديد الكمى الدقيق للإنتاجية.



شكل (٦-٤) تقديرات تكلفة كل قاعدة من الدنا المخلق والمسلسل. للعثور على مصدر البيانات انظر كارلسون «سرعة التكنولوجيات البيولوجية وانتشارها»، ١، رقم ٣ (٢٠٠٣): ٢٠٢-٢١٤.

صارت مقارنة أى من المعايير المعروفة بقانون مور صيغة فقدت معناها من كثرة تكرارها منذ عدة أعوام، ولكن تلك المقارنة تبقى طريقة تصلح مقياسًا لتوقعاتنا عن الكيفية التى سوف تتسبب فيها تقنيات بخلاف تقنيات الحاسبات فى حدوث تغيرات اجتماعية واقتصادية. وأية اختلافات يمكن إدراكها هى أمور لافتة للنظر ومثيرة للاهتمام. وتتبدى أهمية قانون مور فى هذه الحالة لأن مضاعفة وقت الرقائق هى نتاج تخطيط فعلى لصناعة أشباه الموصلات وصناعة الحاسبات. وأكثر أقوال قانون مور جمالاً وإيجازًا فى البحث الأصلى الذى نُشر عن قانون مور هو: أن "عدد الترانزيستورات فى كل رقاقة تتكلف أقل التكاليف لكل ترانزيستور قد تزايد بمعدل يبلغ نحو الضعف كل سنة"[٥]، وعبارة "أقل التكاليف لكل ترانزيستور" هى نتاج عوامل متعددة، منها تكلفة المواد الخام، والحجم الأدنى للترانزيستور الذى تم تصنيعه باستخدام أى جيل من تكنولوجيا تصنيعه، ومعدل الفشل لهذا الجيل من تكنولوجيا التصنيع، وتكاليف تعبئة الرقائق الخام، بحيث يستطيع صناع الحاسبات استخدامها. ومعنى ذلك، فى لب الموضوع، أن قانون مور ظهر من أقوال غالبيتها تتناول التكلفة، وتتناول الاقتصاد بصورة أشمل، وليس من أقوال تقتصر على ما تمليه الفيزياء والكيمياء، ولا حول محدودية التكنولوجيا.

وعلى مستوى أعمق، نجد أن قانون مور يعبر فى المقام الأول عن التكاليف وتخصيص الموارد الرأسمالية اللازمة لبناء مصانع لتصنيع الرقائق. ومع أن الحقيقة تقول إن تكنولوجيا للتصنيع متعاظمة التعقيد كانت مطلوبة بهدف زيادة كثافة الترانزيستورات مع كل جيل جديد من الرقائق، إلا أن المقياس الزمنى لمضاعفة تلك الكثافة لم يتحدد أساسًا بالتقدم التكنولوجى ولكن بالزمن الذى استغرقه تعويض تكاليف بناء المصانع. وبدورها، كانت فترة تسديد الديون دائمًا من اختصاص الدخل المتوقع. وإذن، فى نهاية المطاف، فإن سرعة قانون مور تحددها الحاجة والطلب. وبفضل الإيرادات المتوقعة تستطيع إنتل ومنافسوها أن يمولوا البنية التحتية الهائلة التكلفة التى يحتاجها تصنيع الرقائق. وقانون مور هو توصيف لا لما هو ممكن

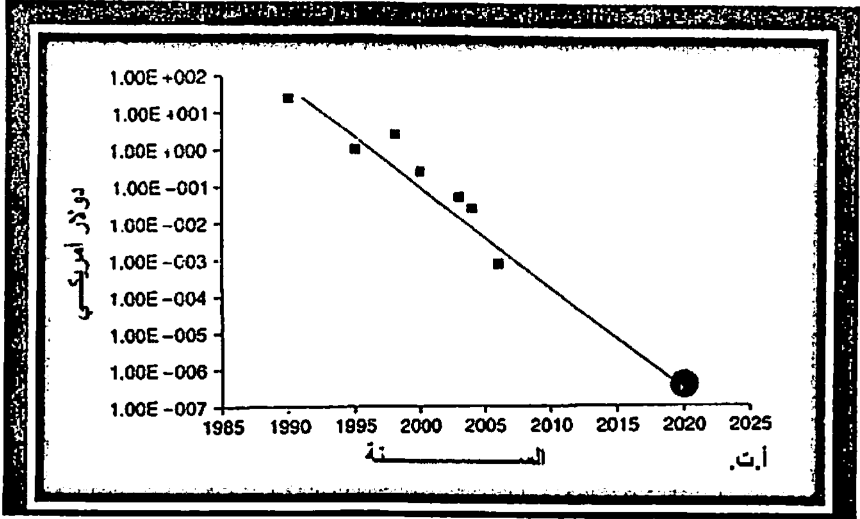
تكنولوجيًا وإنما لما هو معقول اقتصاديًا. ولهذا، فإن قانون مور، وأى مقياس آخر للإنتاجية حتى ولو كان غير مباشر، يحدثنا عن القدرة على العمل الحقيقى فى الاقتصاد بأيدى البشر. وبدوره يستطيع هذا العمل الحقيقى أن يمكننا من إجراء تغيرات ربما كانت أعظم فى الإنتاجية.

ولما كان كل جيل جديد من رقائق الحاسب قادرًا على التعامل مع مهام حاسوبية أكبر، فإن تلك القدرات تتيح تصميم رقائق تالية ذات قوة أعظم. وبمعنى آخر، حدث طوال غالبية فترة الثلاثين سنة الأخيرة أن كانت ثمة معرفة ارتجاعية (feedback) بين تصنيع جيل من الرقائق وقوة التصميم التى يستطيعون أن يستعملوها فى تصميم الجيل التالى من الرقائق.

وبمقدورنا الآن أن نشهد بدايات تأثير مماثل فى تطور التقنيات البيولوجية. فمثلاً، تُستخدم الإنزيمات المعدلة، التى تم تطويعها لكى تقوم بأغراض محددة فى العمل، تُستخدم فى تحضير الدنا لأهداف السلسلة وهى نفسها من منتجات مشاريع السلسلة المبكرة. وتُستخدم البروتينات المعاد تجميعها كل يوم لتفسير التفاعلات بين البروتينات داخل الكائنات، وتلك المعلومات تُستخدم بالفعل فى تصميم وبناء شبكات بروتينية جديدة. وتُستخدم الإنزيمات مباشرة فى عمليات للسلسلة تسمى «سلسلة البايروفوسفات» (pyrosequencing) (٦). وهذه التقنية، التى تجمع بين أجهزة للسوائل الدقيقة وأجهزة بصرية، صارت تُستخدم حديثًا لإعادة سلسلة جينوم جيمس واتسون، وهو المكتشف المشارك لتركيبة الدنا، مقابل ما يقرب من مليون دولار. (وهذا الجهد معروف باسم «مشروع جيم» وهو تحسن يتماشى مع نسبة التقدم السابقة تجاه جينوم بشرى يتكلف ألف دولار. انظر شكل: ٦-٥، والحاشية الخاصة به)(٧). وتسارع القدرات الذى أوضحه مشروع جيم هو مؤشر لما سوف يحدث عندما نشرع فى التعامل مع البيولوجيا باستخدامها على نطاق واسع وعلى درجات متعددة من التعقيد.

قارن مراقبون سابقون الزيادات فى العدد الإجمالى للجينات المتسلسلة مع قانون مور. غير أن ذلك مثل مزج بين التفاح والبرتقال، لأن الإنتاجية الإجمالية للسلسلة هى معيار للقدرات الصناعية الإجمالية (أى عدد أجهزة السلسَلة المنتَجة والعاملة)، بينما عدد الترانزيستورات فى كل رقاقة هو ظاهريًا مقياس للإنتاجية المحتملة التى ينتجها كل حاسب وحيد. والعدد الإجمالى للجينات التى تمت سلسلتها أقرب تشابهًا مع العدد الإجمالى لرقائق الحاسب الموجودة، أو ربما العدد الإجمالى للعمليات الحاسوبية التى تستطيعها تلك الرقاقات. والمقارنة بين قانون مور وتقديرات الإنتاج اليومى لفرد واحد فى معمل من معامل البيولوجيا هو أمر مناسب، لأن تلك الإنتاجية تحدد كم الفائدة، أو الخراب، الذى يتسبب فيه فرد واحد.

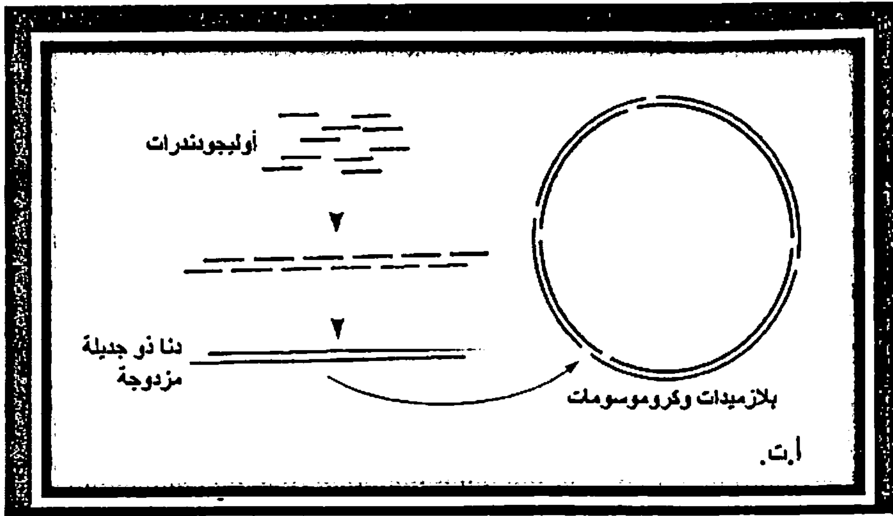
وثمة نص بديل لقانون مور هو "الموارد الحاسوبية تتضاعف كل ثمانية عشر شهرًا عند ثبات السعر". فإذا افترضنا للحظة أن تكاليف العمالة المناسبة المدربة قد بقيت ثابتة، فإن وحدات المحور الرأسى فى الشكل: ٦-٢ (القواعد المخلقة والمسلسلة *لكل فرد فى اليوم الواحد)* تكون مكافئة لمقياس تكاليف الموارد، أى العمالة الصريحة فى هذه الحالة. ولقد تحسنت قدرات الفرد الواحد فى المعمل بصورة مثيرة على مدى السنوات الخمس عشرة السابقة. ولاحظ أن فرضية ثبات تكاليف العمالة متحفظة بدرجة كبيرة. وقد تدنت تكاليف العمالة الخاصة بالسلسَلة مع إحلال العمليات المؤتمتة (الآلية) فوق منضدة المعمل محل حاملى درجات الدكتوراه، تلك العمليات الآلية التى يمكن مراقبتها بواسطة مساعد فنى معمل متواضع التدريب.



شكل (٦-٥) نحو «جينوم يتكلف ألف دولار»، جينوم بشرى كامل مزدوج (٦ بلايين قاعدة) مقابل ١٠٠٠ دولار أمريكي.

كانت التوقعات لمشروع الجينوم البشرى أنه سوف يستغرق ما يقرب من خمسة عشر عامًا وثلاثة مليارات من الدولارات(٨)، ونظرًا للتحسينات والتقدم فى الأتمتة (automation) والكيمياء الحيوية وعلوم الحاسب، فقد انتهى العمل قبل سنتين من الموعد المحدد وبتكاليف أقل من الميزانية بكثير. وترتب على التغيرات فى التكنولوجيا ووسائلها أن شركة «سليرا جينوميكس»، وكانت فرعًا من مؤسسة «أبليرا»، نجحت فى أن تسرع بصورة مثيرة من استكمال مسودة تحضيرية للجينوم البشرى، وإن تكن قد استخدمت جانبًا كبيرًا من المعلومات التى نتجت من المشروع الشعبى. وكان تطور التكنولوجيا جزءًا من خريطة الطريق لمشروع الجينوم البشرى، وكانت الأموال دائمًا متوفرة لشراء العديد من الأجهزة البطيئة فى إطار الخطة الأصلية الخاصة بالتمويل الشعبى للمشروع. وفى بادئ الأمر كان تنسيق الجهود ودفع أتعاب العمالة لتشغيل تلك الأجهزة أمرًا باهظ التكلفة بالنسبة لمشروع يتبع القطاع الخاص.

غير أن ظهور تكنولوجيا جديدة أتاحت تسارعًا كبيرًا في إنتاج السَلسَلات، مما سمح لشركة «سليرا» أن تبدأ برنامجها الخاص بها. ولم يصبح الجهد التجارى ممكنًا إلا بعد أن صارت أجهزة السَلسَلة وتحضير العينات مُأتمتة بدرجة كافية، بحيث يستطيع فرد واحد أن يرعى عدة أجهزة ويمكن استكمال المهمة الكلية في فترة زمنية معقولة. واحتاج ذلك إلى تجهيزات مركزية لإنتاج السَلسَلات لكى يقل عدد الأجهزة، نظرًا لارتفاع أثمانها. وتشبه هذه البنية التحتية نظيرتها في مصانع إنتاج الرقائق الدقيقة (chip fabs).



شكل (٦-٦) تجميع الأوليجودندرات في جينات.

غير أن أجهزة السَلسَلات قد باتت أقرب إلى سلع السوق من الأجهزة اللازمة لإنتاج الرقائق الدقيقة. وأجهزة السَلسَلة منتشرة بالفعل في المعامل، وهناك طلب واضح على أجهزة أسرع وأرخص ثمنًا. وثمة من الأسباب ما يجعلنا نتوقع استمرار تزايد الإنتاجية وانخفاض التكلفة. وعلى ذلك، نجد أنه ليس من الواضح مطلقًا ما إذا كان النموذج المركزى الحالى ستكون له أهمية في مستقبل تقنيات البيولوجيا. ولهذا يبدو مُرَجَّحًا أن الاكتشافات البيولوجية والتكنولوجيات المترتبة عليها سوف تواصل إنتاج تجهيزات أقل تكلفة وفائقة القدرات.

والأمر الأشد أهمية هو، أنه من المحتمل أن توزيع التكنولوجيا البيولوجية وتطويرها على المدى البعيد لن يكون مقيداً باعتبارات اقتصادية. وتواصل تكاليف صناعة الرقائق الارتفاع؛ بينما تواصل تكاليف قراءة الجينومات الانخفاض. وفى حين أن قانون مور هو تنبؤ مبنى على تكاليف رأسمالية مفهومة وتوقعات بتحسن فى التقنيات الموجودة، التى حددت إلى حد بعيد وبشكل ملحوظ طبيعتها الثابتة، إلا أن التقدم الحالى فى البيولوجيا يتمثل فى التحولات المتعاقبة إلى تقنيات جديدة. وتتشارك تلك التقنيات فى ميراث علمى مشترك من البيولوجيا الجزيئية، غير أن تطبيقاتها باعتبارها أدوات تظهر بصورة مستقلة ولها تأثيرات علمية واقتصادية مستقلة.

لقد وصلت تكاليف مصانع الرقائق الدقيقة إلى ما يربو على ستة مليارات دولار لكل مصنع، ومن المتوقع أن توالى الارتفاع، غير أن ثمة أسباباً وجيهة لأن نتوقع أن تكاليف التكنولوجيات البيولوجية سوف تنخفض[٩]، وفى الحق، فإن التكاليف المستمرة لعمليات التتابع (للمستهلكات مثل الكواشف المعملية) قد انهارت أسعارها بطريقة أُسية على مدى غالبية الفترة الزمنية التى غطاها الشكل (٦-٢) [١٠]، وعندما تم استكمال المرحلة الاستهلالية لمشروع الجينوم البشرى سنة ٢٠٠١، أعلن المؤلفون أنه بهذا العمل الرائع وبحلول سنة ٢٠٠٠، قد انخفضت التكاليف الكلية للسلسلة إلى واحد من مئة فى عشر سنوات، مع انخفاض التكاليف إلى النصف كل ١٨ شهراً تقريباً[١١]، وانخفضت تكاليف تخليق الجينات بمعدل مماثل. ومع الأخذ فى الاعتبار عدم وجود بيانات فى الآونة الراهنة إلا بصورة محدودة، فإنه لا يبدو أن التكاليف الإجمالية للسلسلة والتخليق تتناقص بطريقة أُسية (شكل ٦-٤).

ومن المرجح أن نزعات التحولات المتعاقبة إلى تكنولوجيات جديدة، وتزايد القدرات مع انخفاض التكلفة سوف تستمر. وباستخدام المقياس المبسط للإنتاجية، الذى يظهر فى الشكل (٦-٢)، فى السنوات الخمس والعشرين التى ظهرت فيها أجهزة السلسلة التجارية، نلاحظ أن التكنولوجيا قد تقدمت، من عمالة مكثفة تعمل على أجهزة مصنوعة من مادة هلامية مبنية على شريحة إلى أجهزة مبنية على تحليل كهربى

شَعرى فائق الأتمتة، فإلى تتابع بايروفوسفاتى إنزيمى بصورة جزئية. ويستلزم التطلع إلى مستقبل السلْسَلة والتخليق أن نفهم أولاً التكنولوجيا التى أنتجت التقدم الذى ننعم به حتى الآن.

تاريخ سريع لتقنيات السلْسَلة

تم تتابع (أو سلْسَلة) الجينوم البشرى فى المقام الأول باستخدام تنويعات على تقنية تسمى «تتابع سانجر» (Sanger sequencing). وهى طريقة مبنية على حقيقة أن جزيئات الدنا ذات الأطوال المختلفة تتحرك بسرعات مختلفة عندما تتعرض لمجال كهربى، وهى تقنية تسمى «الفصل بالتحليل الكهربى» (electrophoretic separation).

كان جهاز «مسلسِل بيوسيستمز ٣٧٧ التطبيقى»، الذى كان يستخدم بنية ضخمة من المادة الهلامية لفصل شظايا الدنا ذات الأطوال المختلفة، كان العمود الفقرى للجهود المبكرة للسلْسَلة. وكان هذا الجهاز يحتاج عمالة مكثفة لأن المادة الهلامية كان يتم تحضيرها وتعبئتها يدويًا وبدقة فائقة، وهى عملية غير قابلة للأتمتة.

وأتى تعزيزٌ ذو مغزى للإنتاجية من جهاز «بيوسيستم ٣٧٠٠ التطبيقى» وأمثاله من الأجهزة، وفيه حلت محل المادة الهلامية مجموعة من الأنابيب الشعرية الزجاجية الدقيقة. ولأسباب شتى، منها مبادئ الفيزياء وسهولة الأتمتة، كانت السلْسَلة المبنية على الأنابيب الشعرية الزجاجية الدقيقة تحسنًا واضحًا لإنتاجية كل جهاز. ومن الممكن أتمتة تحضير العينات وتعبئتها فى الأنابيب الشعرية ليس فقط لكل جهاز على حدة فحسب وإنما لمجموعة من الأجهزة، مما ترتب عليه بناء مصانع للسلْسَلة فى مواقع متعددة فى أرجاء الولايات المتحدة واليابان وأوربا. وأنتج كل مصنع كميات هائلة من البيانات.

وفى تلك المؤسسات الكبيرة تؤدى روبوتات المعمل العديد من المهام التى تحتاجها السَلسَلة، وتتم كل تلك المهام بواسطة أجهزة متخصصة منظمة فى خطوط إنتاج. وكان ظهور السَلسَلة المبنية على الأنابيب الشعرية إيذانًا بتقنيات مطردة التعقيد، وأدت فى نهاية المطاف إلى تخفيض الزمن والتكاليف المتوقعة لمشروع الجينوم البشرى. وبالتالى خفضت التغيرات الجوهرية فى التكنولوجيا من الحاجة إلى الجهد البشرى، وحسنت إنتاجية كل جهاز، وبفضل إدخال الروبوتات المعقدة تغيرت بصورة جذرية قدراتنا على قراءة المعلومات الوراثية.

وثمة إضافة تكنولوجية حديثة هى السَلسَلة البايروفوسفاتية. ففى حين تعتمد سَلسَلة سانجر على العمليات الإنزيمية فى تحضير العينات قبل السَلسَلة، تعتمد السَلسَلة البايروفوسفاتية بكل وضوح على التعامل الإنزيمى مع الدنا أثناء السَلسَلة. وهذه التقنية متاحة فى مقياس كبير نسبيًا منذ ١٩٩٩، وحديثًا تم استخدام سَلسَلة بايروفوسفاتية بمقياس دقيق للقيام بسَلسَلة سريعة لجينومات جرثومية كاملة بدقة تبلغ ٩٩,٩٩ بالمائة، وهى دلالة مهمة للتكنولوجيا قبل تطبيقها على الجينوم البشرى، بدءًا من «مشروع جيم»[١٢].

وتساعد زيادة الإنتاجية المحتملة المصاحبة للأجيال الجديدة من مُسَلسِلات الدنا على المحافظة على النزعة إلى الانهيار الأُسى فى التكاليف. وهناك فيض متواصل من الأبحاث المنشورة والنشرات الصحفية تعلن عن تكنولوجيات سَلسَلة جديدة بقدرات مطردة الزيادة، ربما تسمح للأفراد بإجراء سَلسَلة منخفضة التكاليف، وبهذا تتحسن الرعاية الصحية. غير أنه مع المعدل الحالى للتحسن فإن الجينوم ذا الألف دولار فقط - أى الجينوم البشرى الذى تتكلف سَلسَلته منذ ابتدائها ألف دولار - ربما لن يكون متاحًا إلا بعد سنة ٢٠٢٠ (شكل ٦-٥). ومن البدهى أن ظهور تقنيات جديدة قد تزودنا بسَلسَلة منخفضة التكاليف قبل ذلك التاريخ.

كيف تكتب الدنا: كيمياء التخليق

من حيث المبدأ، تتيح القدرة على تحديد التعليمات الوراثية بكتابة الدنا من الصفر فرصة لتحديد سلوك الأنظمة البيولوجية. وتُستخدم القدرة على إنتاج الدنا المُخلَّق من مكونات جزيئية أشد بساطة، تُستخدم صناعيًا فى أغراض متعددة، منها إنتاج البروتينات المعاد تجميعها وإنتاج مكتبات الجينات لعمليات انتقاء البروتينات وتخليق بُنى كبيرة من الدنا. وفى الوقت الحالى يمكن تجميع سلَاسِلات جديدة من الدنا بطريقتين. أولهما حصاد (أى جمع) الجزيئات الموجودة فى الطبيعة ثم خياطتها سويًا لتكوين سلَسلات جديدة؛ وهذا هو أساس تقنيات الدنا المعاد تجميعه والمستخدمة فى الثلاثين سنة الأخيرة. والطريقة الثانية هى التخليق الكيميائى للدنا، وفيها يتم تحديد السلَسلة وفقًا للترتيب الذى تضاف به القواعد إلى خيط من النيوكلوتيدات ملتصقة بمادة قاعدية صلبة. ولقد استفادت الأجهزة التى تكتب الدنا من تغيرات التصميم والأتمتة الشبيهة بتلك الموجودة فى أجهزة السلَسلة، رغم أن كيمياء التخليق فى مجملها قد بقيت بدون تغيير لمدة ثلاثة عقود.

والمواد القاعدية غير المحورة المأخوذة من الدنا الطبيعى لا تزال غير مناسبة للاستخدام بواسطة طرق التخليق الكيميائى المتاحة حاليًا. وعوضًا عن ذلك، يتعين تغيير المواد القاعدية بأن تضاف إليها أولاً مجموعة تفاعلية لتسهيل الإضافة المتدرجة ذات المراحل لكل مادة قاعدية لسلَسلة تخليقية. وفى أثناء التخليق يزال التعديل الكيميائى تاركًا الدنا التخليقى (دنا-تخ) (synthetic DNA, sDNA) الذى لا يمكن تمييزه بيولوجيًا عن السلَسلات الموجودة طبيعيًا. وتُستخدَم غالبية أجهزة التخليق فى إنتاج الأوليجونوكلوتيدات القصيرة والتى تُعرف اختصارًا باسم الأوليجات (oligos)، وهى جزيئات مخلقة كيميائيًا من جديلة واحدة ومكونة من أزواج يصل طولها إلى نحو مائة قاعدة مزدوجة. ثم يتم تجميع الأوليجات فى بناءات أكبر مزدوجة الجديلة معاد تجميعها، مثل الجينات المخلقة والبلازميدات (انظر شكل: ٦-٦). ويزيد طول ما نُشِر من البناءات التخليقية حتى الآن على نصف مليون قاعدة مزدوجة

(انظر شكل ٦-١). وفى الوقت الحالى تعرض الشركات التجارية لتخليق الدنا تسليم الأوليجات القصيرة خلال بضعة أيام بتكلفة تتراوح بين ٠,١٠ إلى ٠,٥٠ دولار لكل قاعدة، وتسليم جينات كاملة وسلَسلات أطول خلال أسبوعين إلى أربعة أسابيع مقابل ما يتراوح بين ٠,٥٠ إلى ٥,٠ دولار لكل زوج قاعدى.

تكنولوجيات التخليق

لما كانت الكيمياء الأساسية لكل مخططات تخليق الدنا تكاد تكون متشابهة، فقد نتجت التحسينات فى الأداء من التطابق بين العديد من تفاعلات التخليق المتزامنة. وكان أول أجهزة صنعتها وباعتها شركة «أبلايد بيوسينتشيس: Applied Biosynthesis» لا تستطيع إلا إجراء أربع عمليات سلَسلة فقط فى وقت واحد، فى أوان ضخمة نسبيًا (حمولتها ١ ميلليلتر). وبُنيت أول أجهزة متطابقة على نطاق واسع فى مركز أبحاث الجينوم فى ستانفورد ما بين منتصف تسعينيات القرن العشرين ونهايتها، فى تصميم تم بيعه فيما بعد بواسطة شركة «أجهزة الجينات» (Gene Machine Inc.) وقد صُممت هذه الأجهزة لتخليق الأوليجونوكلوتيدات فى شكل ٩٦ بئرًا، وتعمل فى أحجام تفاعلية أصغر بكثير. وترتب على زيادة التطابق والتصغير فى صناعة الأجهزة أن قدراتها ارتفعت إلى ١٩٢ ثم إلى ٣٨٤ بئرًا تفاعلية مستقلة.

ويستغل وضع الدنا التخليقى على الرقائق إستراتيجية أخرى. فبدلاً من تجزئة تفاعلات التخليق فى أوعية محددة، ثمة وسيلة بديلة لتخليق الدنا يقتصر فيها وضع الأوليجات النامية فى مناطق معينة على سطح رقاقة من السليكون أو شريحة زجاجية. والتخليق على الرقائق يزيد من سرعة التفاعل، ويقلل من استخدام الكواشف ويسهل التعامل مع نواتج التخليق. ويمكن استخدام السوائل الضئيلة الأحجام بجوار غرف تفاعل التخليق مباشرة، وبهذا يخفض من التدخل البشرى والانسكاب. واستُخدمت

طرق أخرى فى تحديد سَلسَلَة الأوليجات فى كل موقع مثل الطباعة الضوئية الحجرية والسيطرة الموضعية على كيمياء الأحماض بواسطة الضوء أو الحرارة ورذاذ الحبر.

أنتجت شركة «أفيمتريكس» أولى رقائق تجارية للدنا، وقد أنتجتها بطريقة الطباعة الضوئية الحجرية. وتحتاج كل طبقة (أى كل قاعدة فى السَلسَلَة) إلى قناع خاص، عادة ما يُنتج بطبقة من الكروم على ركيزة كوارتزية؛ ويتكلف كل قناع نحو ألف دولار. وبهذا يتكلف إنتاج رقاقة مليئة بالأوليجات طولها ٥٠ قاعدة ما يقرب من ٥٠,٠٠٠ دولار، إلا إذا كان من الممكن إعادة استخدام الأقنعة.

ومن الممكن استخدام وسائل أخرى للسيطرة على الكيمياء الموضعية على سطح الرقاقة. فبدلاً من استخدام أقنعة بها مساحات شفافة وأخرى معتمة للتحكم فى تعرض الرقاقة للضوء، عمدت شركة «نيمبلجن» إلى عدد من المرايا الضئيلة توجه الضوء إلى مواضع محددة على الرقاقة. ويمكن التحكم فى هذه المرايا عن طريق الحاسوب، مما يقلل تكاليف الإنتاج مقدمًا. ويضاف إلى ذلك أنه من الممكن تخيل أن طابعة دنا لحاسوب مكتبى يمكن تصميمها باستخدام تلك التقنية، وهو ابتكار سوف يزيد بصورة مثيرة من فرص الحصول على الأوليجات المخلقة.

ويمكن استخدام طابعات الحاسب الزهيدة الثمن من النوع الذى يضخ الحبر (ink-jet) لوضع القواعد حسب الرغبة على سطح رقاقة. وهذه التقنية تسوقها تجارياً شركة «أجيلنت». كما أنه من الممكن أيضًا طبع صفوف الدنا باستخدام الدبابيس لوضع السائل فى المكان المحدد، رغم أن هذه التقنية تستخدم غالبًا فى طبع الأوليجات سابقة التخليق التى أُنتجت إما كيميائيًا أو استُخلِصت من كائن باستخدام تقنية «بى سى آر» (PCR).

وتحمل تقنية تخليق الدنا المبنية على الرقائق بين ثناياها احتمالات إنتاج المزيد من الأوليجات لكل دورة للجهاز، وبتكاليف أقل من التخليق الكبير الحجم على

أطباق معملية متعددة الآبار. فمثلاً نجد أن صفوف المرايا الضئيلة الحجم التى تستخدمها شركة «نيمبلجن» تحوى ما لا يزيد إلا قليلاً على ثلاثة أرباع مليون مرآة. وكل مرآة، من حيث المبدأ، يمكن استخدامها فى التحكم فى سلسلة واحدة من الأوليجات. ومع ازدياد إمكانات التحكم فى الأوليجات على الرقاقة صار من الممكن تصنيع سلسلات أطول بكثير من الدنا وبتكلفة أقل. وقد نشأت حديثًا خطوة أولى فى سبيل تنفيذ هذا التوجه بتجميع أوليجات مشتراة تجاريًا داخل بيئة من السوائل ضئيلة الحجم[١٣]. وأمكن للباحثين استخدام كميات متدنية من الكواشف مع انخفاض كبير فى نسبة الخطأ. ومن الجلى أن تلك الطريقة هى أول تطبيق لتقنية جديدة فائقة القوة، سوف تزداد فوائدها مع دخول وسائل إضافية أشد تعقيداً فى طرق التجميع الجزيئى.

وتزودنا البيولوجيا نفسها بأدوات تساعد على تجميع بُنَى كبيرة من الدنا. وثمة بحث نُشر حديثًا يبين استخدام نظام موجود فى الطبيعة لتصحيح الأخطاء يسمى «بروتين موت – س الرابط لعدم تطابق الدنا» لاكتشاف الأخطاء أثناء التخليق[١٤]. فقد أُضيف «موت – س» إلى تجمع من الأوليجات أثناء تجميعها. فارتبط البروتين بالمنتجات التى بها أخطاء، ومن ثم أُزيلت من التجمع، وبذلك زاد الجزء الصحيح من السلسلة. وينتج من دورة واحدة لهذه العملية معدل خطأ يبلغ نحو ٤٠٠٠ : ١ قاعدة (أى تقريبًا كل ٤ جينات). وتقلل دورة أخرى من تصحيح الأخطاء معدل الخطأ إلى ~١ فى كل ١٠,٠٠٠ قاعدة. ويبلغ هذا المعدل مبلغًا من الانخفاض يكفى لإنتاج بُنَى ذات جينات متعددة الأطوال تناسب الاستخدام فى الدوائر الوراثية المعقدة. وهذه التقنية هى قيد الاستخدام حاليًا بالفعل تجاريًا، وامتد استخدامها لتشمل تجميع سلسلات متعددة فى نفس الأنبوبة[١٥]، والجمع الذى لا مفر منه بين التخصيب المتكرر بواسطة «موت–س» مع التعامل فوق الرقاقات بالسوائل الضئيلة الحجم فى تخليق الدنا سوف يكون أول مثال للأجهزة المهجنة التى تستغل كلاً من أدوات البيولوجيا التى ظهرت حديثًا والتقنيات الناضجة للتصنيع الدقيق.

توقعات مستقبل التخليق والسلسلة

يشكل الإسراع فى تطوير تقنيات السلسلة بؤرة اهتمام البرامج الحكومية الكبيرة فى الولايات المتحدة. وفى أواخر عام ٢٠٠٦، أطلقت «مؤسسة جائزة إكس» مبادرة جائزة أركون إكس للجينومات بهدف معلن هو تحقيق فوائد للرعاية الصحية، مع وعد بجائزة مقدارها عشرة ملايين دولار لمن يستطيع تطوير تقنية قادرة على سلسلة جينومات مائة شخص فى عشرة أيام وبتكلفة لا تزيد على ١٠,٠٠٠ دولار للجينوم الواحد. وربما تكون تلك المسابقة قد انتهت عندما يرى هذا الكتاب النور.

وتستخدم أجهزة السلسلة من الجيل التالى تنوعًا كبيرًا من الإستراتيجيات التكنولوجية، بدءًا من تحسينات على طريقة سانجر للسلسلة إلى التعرف المباشر على القواعد حسب تركيبتها الكيماوية. وفى الحق، ثمة العديد من الإستراتيجيات المختلفة بحيث لا يكون من الضرورى مناقشة تفاصيل كلٍ منها لكى نتعرف على الاتجاه العام للتفكير.

وتخفيض تكلفة السلسلة هو هدف العديد من الشركات بأمل أن تقتنص حصة من السوق الهائل الواعد لعلوم الجينوم الطبية. وفى الوقت الذى كان فيه هذا الفصل من الكتاب يُكتَب كان السباق على أشده للوصول إلى الجينوم البشرى الذى يتكلف ألف دولار. وفى الوقت الحالى تُسَوِّق شركة «إليومينا» جهازًا قادرًا على إعداد معلومات عن سلسلة بليون قاعدة فى اليوم الواحد. وتعد شركة «هليكوس بيوساينس» بجهاز ذى تكلفة أقل سوف تنتجه ويستطيع إنجاز عدة مئات الملايين من القواعد يوميًا، ومن المتوقع أن يكون قابلاً للتطوير إلى ما هو أكثر من عدة بلايين قاعدة يوميًا مع تحسن الأدوات والبرمجيات وعمليات الكيمياء الحيوية.

وإذا ما استمرت الاتجاهات فى التكاليف والإنتاج التى وصفناها آنفًا لعقد آخر، فإنه سرعان ما سيكون بمقدور فرد واحد على منضدة المعمل أن يسلسل أو يُخَلِّقَ كل الدنا الموجود عند كل البشر الموجودين على ظهر الكوكب عدة مرات على مدار يوم عمل

من *ثماني ساعات*، حتى مع التكاثر البشرى المفرط. وكذلك يستطيع شخص واحد أن يسلسل دناه الشخصى خلال ثوان.

وعلى الرغم من السمة الخيالية لهذه الأرقام، فليست ثمة أسباب مادية تمنع أن تستغرق سلسلة جينوم بشرى واحد أكثر من بضع دقائق. وتحتاج سلسلة بليون قاعدة فى ألف ثانية إلى الاستعلام عن كل قاعدة فى واحد على ألف من الثانية، وهو أمر فى متناول الكثير من الأنظمة. وعلى سبيل المثال، نجد أن محركات الأقراص الزهيدة الثمن تقرأ بالفعل المجالات المغناطيسية بليون مرة فى الثانية. وعلى الرغم من أن وسائل التخزين هى مثال على تكنولوجيا ناضجة فإنها أيضًا إشارة إلى نوع التفاعل الذى سوف يكون ممكنًا مع الأنظمة البيولوجية. وفى الحق لا يبدو أمرًا يتسم بالحكمة أن نفترض قيودًا تعسفية على التطبيقات المحتملة لقدراتنا الحديثة النشأة على التلاعب بالمواد على مستوى الجزيئات المنفردة. وكل أسبوع هناك أمثلة جديدة مثيرة على تصوير الجزيئات والأشياء الصغيرة مثل أنابيب النانو الكربونية والتلاعب بها، وكل ابتكار جديد يتخطى حدود الخيال السابقة ويدفعها إلى المؤخرة. والتقنيات المهجنة التى تستخدم قياس نشاط الإنزيمات المنفردة قد تؤدى إلى سلسلة فائقة السرعة[١٦]. غير أنه قد يحدث عند نقطة معينة، ورغم السرعة المتزايدة، أن تصل قدرات السلسلة إلى مرحلة استقرار فى الفوائد، ما السرعة المناسبة؟ ويثير ذلك موضوع إلى متى يكون الجهد المبذول فى تطوير تقنية سلسلة سريعة استثمارًا حكيمًا.

والتحدى الأشد وطأة هو الحساسية، فالبيولوجيا تتعامل مع وحدات مكونة من خلايا وحيدة، وهى المستوى الذى يتعين علينا التعامل معه فى سبيل إعادة برمجة الأنظمة البيولوجية والتعامل مع أمراض شتى. ومرض السرطان هو أحد تلك الأمراض. وعادة ما لا يكون عضوًا أو نسيجًا كاملاً هو الذى يصاب بالمرض، ولكن خلية واحدة تخرج عن سيطرة مسارها التطورى - بسبب تطفر عشوائى، أو تغيرات فى البيئة، أو عدوى - ثم تعيث فى الجسم فسادًا. وبالمثل، تبدأ العديد من أنواع العدوى بهجوم من جراثيم معينة تصيب خلايا معينة، حتى لو كان الأمر يحتاج

إلى تكـرار العدوى بصـورة متـزامنة لكى تظـهـر الأعراض بكاملها. ومن الجلى أن مدى تلك الأحداث يـجـد اهتمامًـا لدى العلمـاء والأطبـاء المهـتـمـين بعـزل الجـراثيم الجديدة وفهمها، سواء الطبيعى منه أو الاصطناعى. ولكن ليس ثمة حاليًا من تقنية متاحة تجاريًا تتيح سلسلة جينوم خلية وحيدة بدون خطوات تعزيزية تنتج منها أخطاء جسيمة (رغم أن كثيراً من المعامل الأكاديمية والشركات تَعِدُ بالقدرة على إتمام مثل تلك التقنية سريعًا). وتحتاج غالبية التقنيات الحالية، وبخاصة تلك التى تُستَخدم لتحديد التفاعلات بين البروتينات، تحتاج إلى عدد كبير من الخلايا، وبهذا تنتج بيانات هى متوسط أحوال تلك الخلايا. وبالمثل، نجد أن أبحاث الأحوال الأيضية أو البروتيونية[*]. للخلايا (بدون استخدام التعديلات الجينية) لا تتم فى الغالب إلا بوجود عينات كبيرة الحجم.

وبغض النظر عن اتجاه مسار التطور التكنولوجى، نجد أن القدرات التخليقية والسلسَلية التى ستكون متاحة لفرد ما فى العقد القادم سوف تكون مبهرة، وسوف تسهل كثيراً من التلاعب بالأنظمة البيولوجية. ومن المفترض بصورة عامة أن تكلفة كل جهاز سوف تنخفض، تماشيًا مع الاتجاه العام للسلع المماثلة، مما يعنى أن البنية التحتية للتكنولوجيا البيولوجية ستكون واسعة الانتشار. وثمة دلالة واحدة على تلك النزعة، وهى أن الأجزاء اللازمة لصنع مُخَلِّق تقليدى للدنا – وكلها أنابيب وإلكترونيات من المتاحة على أرفف الحوانيت – يمكن شراؤها الآن بأقل من ٥٠٠٠ دولار. والجهد المبذول فى التجميع والتكاليف يماثل ما يُنفق من جهد زمال فى هوايات مثل إصلاح السيارات والحواسب[١٧].

(*) البروتيونية (Proteonics) فرع من فروع التكنولوجيا البيولوجية يتناول تطبيق تقنيات البيولوجيا الجزيئية والكيمياء الحيوية وعلوم الوراثة لدراسة تركيب ووظائف وتفاعلات البروتينات التى تنتجها جينات خلية معينة أو نسيج معين أو كائن معين، مع تنظيم المعلومات فى قواعد بيانات وتطبيقات البيانات. (المترجم).

على الرغم من البنية التحتية الموجودة والتى تتيح تنزيل السلسلات من الإنترنت مباشرة فى مُخلِّق، فإن امتلاك مُخَلِّق للدنا لا يعنى القدرة على صناعة كائن جديد. فالتخليق الكيميائى الراهن لا ينتج إلا قطعًا قصيرة من الدنا. والأمر يحتاج إلى البراعة والدقة لتجميع جينات ذات أطوال كاملة، رغم أن التقنيات اللازمة موصوفة بالفعل فى الدوريات العلمية. وهناك حوافز اقتصادية مؤثرة لتحويل مثل ذلك التجميع إلى شىء روتينى، وقد نشأت شركات عديدة لتنسيق التفاصيل المهمة للتصنيع، ولكى تتحقق الفائدة من الطلب المتزايد على سلسلات تخليقية طويلة للدنا.

التوزيع الجغرافى للتكنولوجيا

فى الوقت الحالى يجد العديد من المستخدمين أنه من الأوفر لهم اقتصاديًا أن يبتاعوا أجهزة تخليق الدنا بالاستعانة بمصادر خارجية لا أن يعملوا بمُخَلِّقات مصنعة داخليًا. بمعنى أن غالبية الناس يحصلون بالفعل على الدنا بطلبها عن طريق البريد. ولقد صارت الأوليجات التى يبلغ طولها طول الجينات، منتجات سلعية، كما يبينها التوزيع العالمى لمسابك تخليق الدنا التجارى (شكل ٦-٧). غير أن الطلب بالبريد للسلسلات التى بطول كائنات بأكملها لا يزال أمرًا نادرًا فى الوقت الراهن. والطرق التجارية لتجميع عدة ملايين من القواعد المتجاورة لتحديد جراثيم معينة مجهدة من ناحية العمالة، وبالتالى فهى باهظة التكاليف. ولكن ذلك العائق بالقطع سوف يتهاوى مع ازدياد قدرات الأتمتة والتخليق على الرقائق أو مع دخول أدوات بيولوجية جديدة فى عملية التخليق. وتتوقع شركات التخليق أن يستمر الانخفاض السريع فى الأسعار فى المستقبل المنظور[١٨].

وتقوم الشركات بالإعلان عن تسليم جينات مخلقة فى عدد من الأقطار، سواء كانت تلك الشركات تستخدم تقنيات التخليق التقليدية (المتاحة جماهيريًا) أم الطرق المملوكة ملكية خاصة. ففى ٢٠٠٥ تعاونتُ مع جيرالد إبشتاين وأن يو

من «مركز الدراسات الإستراتيجية والدولية» (CSIS) فى إنتاج خريطة للشركات التجارية المنتجة للجينات، والتى نشرتُها مبدئيًا على الشبكة العنكبوتية[١٩].
ثم نشرت مجلة «وايرد» (Wired) نسخة معدلة من الخريطة مع بعض البيانات والتقارير الإضافية؛ والشكل (٦-٧) هو النسخة المنشورة فى كتاب «مستقبل تخليق الجينوم والتصميم: تأثيراتها على اقتصاد الولايات المتحدة[٢٠].
(Genome Synthesis and Design Futures: Implications for the U.S. Economy)
ويبين سجل أحدث للمؤسسات التى تصنع الجينات وتقدم خدمات التخليق بطول الجينوم، أن عدد الشركات داخل الولايات المتحدة يبلغ ٢٥ شركة، مع وجود عدد مماثل من الشركات منتشر فى كل أنحاء العالم[٢١]. وإليكم بعض التعليقات حول الخريطة:
قد يعود اختفاء شركات تخليق الجينات فى أمريكا الجنوبية إلى استخدام اللغة الإنجليزية فى البحث؛ ونفس السبب قد يعلل انخفاض تمثيل الشركات فى آسيا وبعض مناطق أوربا الشرقية. وفى حين نجد أن هناك توقعات بزيادة استخدامات الأوليجات من جراء انتشار تطبيقات الدنا المخلق سواء فى الفحوص التشخيصية أو فى العلوم الأساسية، إلا أنى مندهش من حجم العروض التجارية للجينات الكاملة الطول حول العالم.

وتقدم الشركات الواردة فى شكل (٦-٧) خدمة إرسال الجينات المخلقة بالبريد؛ وقد بُنيت قائمة تلك الشركات على السلسلات التى تُقَدَّم عبر الشبكة العنكبوتية، ولا يتم فيها كلها التأكد من عدم وجود سلسلات للجراثيم المُمْرِضَة المعروفة ولا عدم وجود سموم بيولوجية. وحديثًا اقترح «الاتحاد الدولى لتخليق البولينيوكلوتيدات» (ICPS) والمكون من مواطنين يهمهم الأمر من الأوساط الصناعية والأكاديمية، إطارًا لتتبع الطلبات البريدية للجينات المخلقة لتحسين الأمن والحماية[٢٢]، وسأعود إلى مناقشة النجاح المحتمل لتلك الخطط فى فصول لاحقة.

وحتى لو اتُّخِذت الاحتياطات لتحجيم التخليق التجارى للدنا من الجراثيم المرضة أو السموم، فمن غير المحتمل أن الحيل الكيميائية والآليات التى تلجأ إليها

تلك الشركات أثناء تكوينها يمكن أن تظل قيد الكتمان بين جدرانها. وأعتقد أن ضغوطًا اقتصادية قوية سوف تنشأ للاستمرار فى تسويق أدوات تخليق الأوليجات عالية الإنتاج، ثم إلى أدوات للسوق قادرة على تقبل مشاركة كواشف بسيطة ومواصفات إلكترونية تنتهى بإنتاج جينات وجينومات تخليقية متكاملة.

وفى أعماق الهندسة تكمن المقدرة على العمل بغير براعة والتجربة المتسرعة للاحتمالات المختلفة، مع نبذ ما لا يعمل ومتابعة الممكن. ويتزامن انتشار المهارات مع انتشار التقنيات التى تتقدم بالسرعة الكامنة بين ثنايا النمو الاقتصادى الذى يتضح فى شكل (٦-٧)، وسوف نتناول فى الفصل التالى نمو المساهمة الدولية فى مسابقة «أى-جم» وهى فى حد ذاتها مقياس للشهية المثيرة للإعجاب للتكنولوجيا البيولوجية فى أنحاء العالم.

شكل (٦-٧) موردو تخليق الجينات التجارى. نحو ٢٠٠٥. الشركات التى تورد خدمات تخليق الجينات موزعة عالميًا.

الفصل السابع

المسابقة الدولية لأجهزة الهندسة الوراثية

قد لا تظن أن جعل الجراثيم لها رائحة الموز قد يغير العالم. غير أنه حدث فى صيف ٢٠٠٦ أن فريقًا من خمسة طلبة من «معهد مساتشوستس للتكنولوجيا» (MIT)، ويفتقرون إلى أية خبرات معملية سابقة يعتد بها، بنوا دارة جينية سوف تغير من الطريقة التى يفكر بها الناس فى هندسة الأنظمة البيولوجية.

تعيش جرثومة الإشكريشيا القولونية (الإيكولاى) (Eschericia Coli, E.coli) فى أمعاء الثدييات، وتشكل عنصرًا مهمًا من عناصر الجهاز الهضمى. ومن البدهى أن جرثومة الإشكريشيا القولونية الموجودة طبيعيًا رائحتها تشبه رائحة البراز. وسبب الرائحة هو وجود مادة الإندول، وهى مادة تفرزها الجرثومة وتُستخدم فى الاتصالات بين الخلايا وتكوين الغشاء الخلوى[١]، وشرع الطلبة الخمسة، الذين كانوا مشاركين فى مسابقة أجهزة الهندسة الوراثية الدولية «آى جم» وقد انتهوا من سنتهم الأولى أو الثانية فى معهد إم آى تى، شرعوا فى إعادة برمجة رائحة جرثومة الإشكريشيا القولونية باعتبارها مشروعًا صيفيًا. واحتاج العديد من الطلبة لتلقى مقرر دراسى تمهيدى فى علوم الوراثة[٢]، وانبهر الجميع بالتقدم الذى أحرزه الفريق فيما لا يزيد على بضعة أشهر بما فى ذلك أساتذتهم فى المعهد.

وكما سوف أصف بشىء من التفصيل طوال هذا الفصل من الكتاب، لم يكن النجاح الذى حققه مشروع «رائحة الإشكريشيا القولونية» (Eau d'E. coli) نتيجة

لتطبيق المبادئ التقليدية للهندسة فى البيولوجيا. وإنما تم تجميع الدارة الناتجة، مثلما يحدث فى تصميم الطائرات الحديثة وتصميم الحواسب، لا بمعرفة الكثير من التفاصيل الجزيئية، وإنما بالتوصل إلى تلك التفاصيل من خلال استخدام الأجزاء ذات الوظائف المحددة مسبقًا بغرض تبسيط جوهرى لعملية التصميم والبناء. ولم يحدث إلا فى أحوال الضرورة القصوى أن اضطر الفريق إلى الخوض فى التفاصيل، مثلما حدث عندما طوروا قطعًا جديدة طبقًا للمعايير التى حددتها مسابقة «أى جم». وتضمنت الدارة المخلقة التى نتجت من مشروع 'رائحة الإشكريشيا القولونية» ٢٥ مكونًا رائعًا.

ومن المنطقى أن نتساءل عن مدى أهمية أى مشروع من مشاريع مسابقة «أى جم» كخطوة تجاه هندسة بيولوجية حقيقية. والموضوع المهم هو أن مشروع 'رائحة الإشكريشيا القولونية' » هو خطوة إلى الأمام، وإن كانت مجرد واحدة من خطوات كثيرة ينتظر أن تظهر. ويضاف إلى ذلك أنه يعتبر مثالاً واضحًا للمنهجية الهندسية مطبقة فى الدارات البيولوجية. ورغم ذلك، فالأمر يحتاج لحدوث مزيد من التقدم قبل أن تصبح للبيولوجيا التخليقية تأثيرات تكنولوجية أو اقتصادية.

بدأ تنظيم مسابقة «أى جم» لأول مرة سنة ٢٠٠٤، وقد بلغت أعداد المشاركين فيها الآلاف بالفعل من جميع أنحاء العالم. والفرصة متاحة أمام كل متسابق أن يشاهد ثمار تطبيق منهج هندسى مبنى على القطع القابلة للتركيب على الأنظمة البيولوجية. كما أن كل متسابق أمامه فرصة أن يتلاعب بالدنا لبناء نظام حى لم يسبق له الوجود من قبل. وغالبية المشاريع تفشل، والعديد منها به طموح زائد، غير أن الجميع يتمتعون كل عام بقضاء وقت طيب، وأهم من ذلك أنهم يتعلمون كثيراً. وأفضل وسيلة لفهم التقدم الرائع الذى تمثله مسابقة «أى جم» هو أن نبدأ منذ بدايتها.

تعود فكرة «أى جم» إلى عام ١٩٧٨، فى مقرر دراسى عن تصميم الدارات ألقاه لين كونواى فى «إم أى تى». وانتشر هذا المقرر خلال عامين إلى ما يربو على مائة جامعة فى الولايات المتحدة. وبمشاركة من كتاب ألفه لين كونواى وكارفر ميد، قدم المقرر

لآلاف الطلبة فى أنحاء البلاد «تصميمات لدارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر» (VLSI) سرعان ما انتشرت عبر العالم[٣].

يعود سبب انتشار «تصميمات لدارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر» فى المقام الأول إلى فصل التصميم عن التصنيع. فقبل سنة ١٩٧٨ كانت التركيبة الإلكترونية لدارة ما تعتمد على العمليات والتجهيزات المستخدمة فى إنتاج الدارة الفيزيائية التى تعنى أن مصمم الدارة كان يتعين عليه استخدام أدوات التصميم الخاصة بكل صانع. وتمثلت عبقرية فكر ميد وكونواى فى تقديم قواعد لتصميم الدارات سهلة التعلم والاستخدام على المهندسين، ويمكن تنفيذها بسهولة بواسطة الصناع بصرف النظر عن أدواتهم ووصفاتهم الخاصة. ولقد كانت ثمة مقاومة مبدئية لذلك التغير بين أوساط الصناعة، مع إصرار الصناع على أن التصميم المثمر يعتمد على معرفة وثيقة بعمليات تصنيع السليكون [٤].

تجاهل ميد وكونواى ببساطة كل تلك الاعتراضات. وقام كونواى بالتدريس وتبنى الطلبة منهجيته بحماس. وأحياناً كان الطلبة يتلقون نسخاً من رقاقاتهم جاهزة للعمل فى ظرف أسابيع من تقديمهم تصاميمهم.

يعود نجاح تنفيذ برنامج «تصميمات لدارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر» إلى اعتماده على «فكرة التسلسل الهرمى» وفيه تكون القرارات مستقلة فى المستويات المختلفة للتصميم والتصنيع. ويمكن تفصيل التسلسل الهرمى الذى استخدمه ميد وكونواى على النحو التالى:

١- المواد التى تُصنع منها الرقاقات وتقنيات تصنيعها موحدة القياس على مستوى الذرات والكيمياء.

٢- هذه المواد والتقنيات تتيح تصنيع قطع ذات مواصفات محددة، مثل المقاومات والمكثفات والترانزيستورات.

٣- يمكن استخدام هذه القطع فى بناء أجهزة بسيطة، وبخاصة عناصر التخطيط والذاكرة.

٤- تشكل هذه الأجهزة لبنات بناء الأنظمة، مثل سجلات المناويات (shift regi sters) والمبدلات (relays) وغيرها من العناصر العاملة التى تعمل كلبنات بناء فى الدارات المدمجة. وحتى اليوم، يتم تعليب الأنظمة البسيطة كدارات مدمجة مستقلة لاستخدامها فى بناء نماذج أولية وفى إنتاج كل شىء من دوائر السيطرة على تشغيل الأجهزة إلى كروت الفيديو.

٥- والفكرة الأخيرة التى استخدمها ميد وكونواى كانت صياغة قواعد تصميم دوائرهم بحيث لا تكون مرتبطة بالحجم الحقيقى للمنتج النهائى. ففى سنة ١٩٨٠ كانت آخر صيحة فى تكنولوجيا بناء الدوائر المدمجة تنتج أسلاكًا قطرها نحو ٣ ميكرومترات. وقد فضل ميد وكونواى أن يبنيا منهجًا فى التصميم يستطيعان بواسطته أن يخفضا تدريجيًا من قطر السلك الذى وصل اليوم إلى نحو ٤٠ نانومتر، وهو تخفيض بنسبة تقارب مائة مرة فى ٢٥ سنة.

يتيح القطر الضئيل للسلك وضع عدد أكبر من القطع فى مساحة بعينها على الرقاقة، والزيادة الناتجة عن ذلك فى كثافة الترانزيستورات هى الدعامة التكنولوجية لكل قوة الحاسب الآلى التى نلمسها اليوم. وأمكن تحقيق تعقيدات دوائر اليوم بفضل منهجية برنامج «تصميمات لدارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر»، والتى من خلال إدماجها لكل طبقات الفكرة التى وصفناها سابقًا، تتيح للقطع والأجهزة والأنظمة الموحدة القياس أن تعمل كما هو متوقع بصرف النظر عن الطريقة الخاصة التى تم بها تصنيع كل قطعة. ويمكن استخدام العبوات المصممة بالاستعانة بالحاسب الآلى لتركيب الدوائر دون التفكير فى الذرات أو الكيمياء المستخدمة فى تصنيعها. وهذا بالضبط هو نفس نوع التفكير الذى تحدثنا عنه فى الفصل الثانى الذى يتيح للسيارات أن تُبنى من قطع ذات وظائف محددة بغض النظر عن صنع تلك القطع والمادة التى استُخدِمت فى صنعها.

والخلاصة إذن، أن ما فعله ميد وكونواى من فصلٍ للتصميم عن التصنيع كان يعتمد على فكرة التسلسل الهرمى مما ترك المهندسين يركزون على مستوى التعقيد الذى يهتمون به، دون الحاجة للاهتمام بتفاصيل مستويات أخرى من التعقيد. وقبل برنامج «تصميمات لدوائر مكونة من أنظمة بالغة الكبر» كان من المطلوب إدخال مواصفات التصنيع فى الاعتبار مما جعل تصميم الدوائر أمرًا بالغ الصعوبة والتعقيد. وجعل هذا البرنامج المهندسين يغيرون من تفكيرهم فى الذرات والكيمياء ويركزون على الترانزيستورات والدوائر، وبهذا غيروا الصناعة تغييرًا كاملاً.

وفى خلال عامين ظهرت فى الأسواق الرقاقات المصممة بنظام برنامج «تصميمات لدوائر مكونة من أنظمة بالغة الكبر»، وبدأت سنة ١٩٨٠ بموتورولا ٦٨٠٠٠. ولا تزال تركيبة تلك الرقاقة مستخدمة حتى اليوم، وتحسنت بصورة أفضل منهجية «التصميم - إلى - البناء» (انظر الفصل الخامس) التى بلغت ذروتها بإسهامات ميد وكونواى. واليوم، بات إنتاج رقاقة جديدة لا يتطلب أكثر من الجلوس أمام الحاسب، وتصميم الدارات بواسطة برمجيات، ثم إرسال التصميم إلى مصنع قد يوجد فى أى مكان فى العالم، ثم انتظار المنتج النهائى الذى سوف يصل بالبريد. وتحوى هذه الرقاقات الآن بلايين من المكونات. ويشكل هذا الأسلوب الهندسى القاعدة الأساسية لعائدات سنوية تبلغ مئات البلايين من الدولارات على مستوى العالم تأتى من منتجات تتراوح بين أجهزة خاصة بالإنترنت إلى الهواتف المحمولة إلى الحاسبات التى تزداد باستمرار قوةً وانتشارًا.

دخول التعقيدات الهندسية إلى البيولوجيا

أدت التأثيرات التراكمية لتوحيد القياس وفصل التصميم عن التصنيع والأفكار إلى انفصال كل ما هو «كهربى» عن الهندسة الكهربائية. وحاليًا، يرى توم نايت، وهو عالم عالى المقام فى معمل علوم الحاسب والذكاء الاصطناعى فى معهد «إم آى تى» ومن

بين أقدم المشاركين فى تصميم الأجهزة والبرمجيات لشبكة «أربانت» : ARPANet»[*]، يرى أن مجال تخصصه الآن هو «هندسة التعقيد»: "فى غالبية الأحوال، نجد أن الارتباط بين الهندسة الكهربائية والكهرومغناطيسية يكاد الآن أن يكون أمرًا عارضًا. ولقد تحولنا إلى مهندسى تعقيدات بدلاً من أن نكون مهندسى كهرباء ومغناطيسية. وليس ثمة سوى قلة من فروع المعرفة تعمل فى تصميم وبناء ومعالجة أنظمة على نفس الدرجة من تعقيدات أنظمة الحاسبات الحديثة، سواء من منظور الأجهزة، المكونة من بلايين المكونات، أو البرمجيات بما تحويه من ملايين خطوط الشفرات"[٥].

ولقد اتضحت أمام نايت منذ وقت مبكر فوائد استخدام وسائل طُوِّرت للاستخدام فى تصميمات أنظمة الحاسبات، فى الأنظمة البيولوجية. والنجاح فى استخدام هندسة التعقيد ونتائجها المحتملة فى الأنظمة البيولوجية هو أمر آخر بطبيعة الحال. وعلى الرغم من ذلك فإن نايت يندفع قُدُمًا محاولاً أن يحقق أكبر قدر من التقدم. ففى أوائل تسعينيات القرن العشرين شرع فى تعليم نفسه البيولوجيا الجزيئية وعلوم الوراثة، بهدف أن يتعلم كيف يعيد برمجة الجراثيم لبناء أشياء جديدة بمقياس جزيئى. وبناء على خبراته فى تصميم وبناء أنظمة الحاسبات من الصفر، كان دور مهندسى التعقيد فى إيجاد توجه جديد فى الهندسة البيولوجية واضحًا كالشمس أمام نايت: "لدينا فرصة لاستخدام تعقيداتنا وأدوات إدارة المعلومات ... وتحويل الأنظمة البيولوجية إلى مركبات وملخصات ثم فهمها. وبنفس الطريقة التى نُبَسِّطُ فيها المكونات ونلخصها من الفيزياء كى نتمكن من بناء معالجات مكونة من بلايين المكونات، نستطيع أن نحول الأنظمة البيولوجية إلى مركبات ونوجز المكونات البيولوجية ونفهمها، وسوف نفعل ذلك بهدف صريح هو بناء أنظمة كيميا حيوية وبيولوجية اصطناعية. وأعتقد أنه ما من

(*) شبكة وكالة المشاريع البحثية المتقدمة «أربانت» -Advanced Research Projects Agency Net) work, ARPANet) – هى أول شبكة بُنيت عليها شبكة الإنترنت العالمية وتقع فى مقام القلب منها، وأنشأتها وزارة الدفاع الأمريكية للربط بين المشاريع البحثية المتقدمة فى الجامعات الأمريكية ومعامل البحوث المختلفة. (المترجم)

فرع أخر من فروع المعرفة يستطيع فعل ذلك بفاعلية"[٦]، وثمة وسيلة أخرى لشرح تلك القدرات هى «الهندسة إلى الأمام» أو «التصميم إلى الأمام»، أى استخدام نماذج للقطع لها سلوكيات مفهومة باعتبارها أساساً لبناء أشياء أكثر تعقيداً. وبناءً على ذلك بدأ نايت مشروعه بهدف (١) تطوير مجموعة من القطع البيولوجية لها وظائف محددة، و (٢) طريقة للتجميع السهل لتلك القطع فى أجهزة. وفى سنة ٢٠٠١ انضم درو إندى إلى نايت فى «إم أى تى» (انظر الفصل الرابع) وكذلك راندى رتبرج، وهو مهندس ومدير سابق فى شركات صن ميكروسيستمز وآبل، وأسسا «المجموعة البيولوجية الاصطناعية» فى «إم أى تى».

وفى ٢٠٠٣ شرعت المجموعة فى إعطاء مقرر دراسى فى البيولوجيا التخليقية فى فترة الأنشطة المستقلة فى «إم أى تى»، مبنية بصورة صريحة على جهود لين كونواى قبل ربع قرن. وكان السوق التجارى لتصنيع الجينات التخليقية قد ظهر بالفعل آنذاك (انظر الفصل السادس وشكل ٦-٧). وكان على نايت ورفاقه أن يبدأوا فى تجميع باقى الأدوات الهندسية التى تمكنهم من بناء دارات بيولوجية على غرار ما كان يفعله تلاميذ كونواى. وفى ٢٠٠٣ لم تكن مجموعة الأدوات ولا مجموعة القطع قد استُكمِلا بعدُ بما يسمح ببناء أكثر من دارات جينية بدائية. وفى الحق، لم تتمكن غالبية المجموعات إلا من بناء نماذج وتجميع مبدئى لدوائرها. وكان المشروع برمته فى مرحلة مبكرة بحيث "حدث أثناء المقرر الدراسى لسنة ٢٠٠٣، أن الطلبة صاروا يساعدون فى ابتكار وتنفيذ أفكار تتناول 'قطعاً بيولوجية معيارية"[٧].

كان هؤلاء الطلبة راضين تمام الرضاء، بالتجربة، بحيث كرر المشرفون المقرر الدراسى فى ٢٠٠٤[٨]. وعملت المقررات الدراسية لفترة الأنشطة المستقلة كشرح مبدئى لطرق التصميم والتجميع، وشارك الطلبة بعدد صغير من القطع فى «سجل القطع البيولوجية التقليدية» (الذى تناولناه فى الفصل الخامس). وكان عدد من القطع التى استُخدِمت بغزارة فى السنوات التالية قد سبق تصميمها المبدئى وتحديد صفاتها بواسطة طلبة «فترة الأنشطة المستقلة»[٩]. وفى أواخر سنة ٢٠٠٣، تم تمويل «فريق

البيولوجيا التخليقية» بواسطة المؤسسة القومية للعلوم، لينتشر المقرر فى خمس مدارس. وفى صيف ٢٠٠٤، أقيمت مسابقة أجهزة الهندسة الوراثية الدولية «أى جم» بمشاركة من جامعة بوسطون وكالتك وإم آى تى وجامعة برنستون وجامعة تكساس فى أوستن. وفى أول سنة كان كل المشاركين من الخريجين(١٠).

وقبل أن نشرع فى وصف إنجازات المشاركين، نجد من الأوفق أن نعيد زيارة أفكار التسلسل الهرمى(*). الذى يتيح بناء أى شىء من قطع بيولوجية قابلة للتبادل. وفى حين نجد أن ثمة اختيارات متعددة مختلفة لتعريف القطع، إلا أنى سوف أخضع فيما يلى للتعريفات التى أعلنت عنها «مؤسسة بيو بريكس :BioBricks Foundation» واستخدمتها مسابقة «أى جم»:

١- الذرات والكيمياء التى تتشكل منها قطع لبنات البناء البيولوجية وطرق تجميعها تقيدها مقدرة الجراثيم الموجودة على تشفير المعلومات وبناء آلات جزيئية.

٢- الدنا هو المادة التى تُصنع منها القطع. ومن الناحية الوظيفية، يمكن لقطعة ما أن تكون بروتينًا مشعًا للون الأخضر، أو بروتينًا مشعًا للون الأصفر، أو بروتينًا دامجًا للدنا يعمل ككابح، كما جاءت أوصافه فى أمثلة الدوائر فى الفصل الرابع.

٣- عندما تجتمع القطع مع إشارة محفزة مثل الحرارة أو الجزىء المسمى «أى بى تى جى» (IPTG) (وهو المادة الكيماوية المستخدمة فى المفتاح والكابح المتذبذب التى ناقشناها فى الفصل الرابع)، فإن القطع يمكن استخدامها فى بناء جهاز، مثل المروجات القابلة للاستنفار التى تتيح السيطرة على نَسْخ الجينات من خارج الخلية.

(*) ابتكار بشرى يهدف إلى مساعدة من يرغبون فى هندسة أنظمة بيولوجية بالغة التعقيد بواسطة تجاهل التفاصيل غير المهمة. (المترجم)

٤- وكما ثبت من المفتاح الجينى والكابح المتذبذب اللذين سبق الحديث عنهما فى الفصل الرابع، فإن تجميع الأجهزة بطرق مختلفة يسمح ببناء أنظمة تشكل دارات جينية.

٥- فى الوقت الحالى لعل أقرب مثال على قواعد التصميم الذى لا يرتبط بمقياس الرسم الذى تبناه ميد وكونواى، هو الاشتراط على أن الدنا الذى تورده بيوت التصنيع لابد وأن يتكون من السلسلة التى طُلبت. وحتى الآن، لا توجد وسائل متعددة لإنتاج الجينات التخليقية (انظر الفصل السادس)، غير أنه طالما يستطيع بيت تصنيع معين أن يسلم سلسلة معينة، فإن تفاصيل التخليق تصبح غير ذات أهمية[١١].

وهكذا، وبعد هذا السرد المتفائل والمتحمس لعالم المنهجية، ما الذى خرج به الطلبة؟ ومن اللافت للنظر فى هذا التاريخ أن السجلات الخاصة بالسنوات الخمس الأولى غير مكتملة بالفعل. ومثل ما هو حادث فى باقى البيولوجيا، فإن الكثير من المعلومات المفصلة حول «أى جم» ما زال وجودها مقتصراً على ذاكرة المشاركين. ولم تشارك كل الفرق المبكرة بمادة تتناول نتائج لتجارب، وهو شرط وُضع لاحقًا للمساعدة على تنمية ذاكرة مجتمع المشاركين. ولقد نتج عن بعض المشاريع المبكرة بعض الأبحاث التى نُشرت أو كُتبت كجزء من اشتراطات مقرر دراسى جامعى للطلبة المشاركين، غير أنه لا وجود لسجلات منتظمة يمكن الرجوع إليها للسنوات ما قبل ٢٠٠٦. ويضاف إلى ذلك أن السنوات الأولى لـ «أى جم» كانت موبوءة برغبات تواقة إلى جينات تخليقية لا تتناسب مع الإمكانيات الحقيقية للصناعة؛ والعديد من الفرق لم تتلق الجينات التى طلبوها فى الوقت المناسب فلم يتمكنوا من استكمال المشروع الخاص بالمسابقة.

وفى الجزء التالى سوف أخوض فى تفاصيل قد تكون بعيدة عن اهتمامات كل القراء. وفى الجزء الأخير من هذا الفصل سوف أعود إلى تناولٍ أكثر عموميةً لـ «أى جم» فى إطار التطور التاريخى للتكنولوجيا. ومن قبيل الإيجاز، سوف لا أناقش فى الجزء التالى سوى مشاريع مختارة من بين تلك التى أحرزت نتائج وجيهة وموثقة.

وأهدف من ذلك إلى أن أنقل إحساسًا عامًا بما حققه، وما لم يحققه، الطلبة وتلاميذ المدارس الثانوية فى مشروع الصيف، وبهذا أعطى سياقًا لإثبات كيف يتغير المجال بسرعة. وبانتهاء «آى جم» لسنة ٢٠٠٧، فإن العديد من المشاريع قد تحقق لها بالفعل مستوى من التعقيد يضع تفاصيل البناء والعمل خارج نطاق هذا الكتاب.

آي جم ٢٠٠٤

أول صورة فوتوغرافية للجراثيم

كان الهدف الأصلى لفريق جامعة تكساس من مدينة أوستن هو أن يصنعوا فيلمًا بيولوجيًا للجراثيم يمكن بواسطته أن يكتشف حوافًا فى الصور المعروضة. ويتكون الشكل الناتج فى الجرثومة من خطوط تبين الانتقال من الضوء إلى الظلمة فى الصورة الأصلية. ويمكن، على سبيل المثال، استخدام تلك الإمكانات فى محاكاة تخليق المواد أو ترسيبها باستخدام الضوء، وبهذا يتحقق واحد من الأهداف الأصلية لتوم نايت فى تطبيق هندسة التعقيد للسيطرة على إنتاج الأشياء بيولوجيًا.

عرض الفريق نظامًا يتيح السيطرة على التعبير عن جينات جرثومة الإشكريشيا القولونية باستخدام الضوء[١٢]، وعندما تتم إضاءة الدائرة يتوقف إنتاج صبغة سوداء، ويمكن استخدام قناع لتحديد شكل الضوء الذى يتلقاه الفيلم الجرثومى. وكانت التجربة فى حد ذاتها جديدة ومثيرة للاهتمام بحيث إن مجلة «نيتشر» نشرتها سنة ٢٠٠٥[١٣].

لا تملك جرثومة الإشكريشيا القولونية مستقبلات حساسة للضوء، ولهذا كان أول شيء مطلوب من فريق جامعة تكساس أن يُخَلِّقُوا تلك القدرة. وبعد محاولات وتجارب فى اتجاهات مختلفة كان الفريق حسن الحظ أنه تبين له أن جهازًا لفك الشفرات مسيطَر عليه بالضوء قد تم صنعه فى أوائل تلك السنة. فقد نجح أنسلم لفسكايا، أول

طالب فى معمل كريستوفر فويجت بجامعة كاليفورنيا بسان فرانسيسكو فى بناء ذلك الجهاز فى أول مشروع له ثم أهداه فيما بعد إلى فريق جامعة تكساس.

لم يكن لفسكايا ولا فويجت قد سمعا بمسابقة «أى جِم» عندما قررا البدء فى مشروعهما[١٤]. واستخدم لفسكايا كمكونات جينات موجودة طبيعيًا فى كل الكائنات على ظهر الكوكب، وخاطها معًا مستخدمًا أدوات تقليدية من البيولوجيا الجزيئية. وكانت النتيجة بروتينًا محولاً للطاقة ويعمل بالضوء، مخيطًا معًا بواسطة كشاف جرثومى حساس للضوء القرمزى وكشاف حساس للأملاح من جرثومة الإشكريشيا القولونية، وهذا البروتين ينظم فك شفرات الجينات استجابة للضوء الأحمر[١٥].

ومن الجدير بالانتباه أن نذكر هنا أن التفاصيل الفيزيائية الكيفية التى بها يُحَوِّلُ المستقبِل الحساس للضوءِ الضوءَ إلى إشارة جزيئية لا تزال مبهمة وغير واضحة. وبذلك تبقى الحكاية بصورة عامة غير مكتوبة عما يحدث بين الوقت الذى يُمتص فيه فوتون ضوئى بواسطة المستقبِل والوقت الذى يتعدل فيه معامل النسخ. وفى حين تم فهم الكشاف الجرثومى الحساس للضوء القرمزى، وتم فهم الكشاف الحساس للأملاح من جرثومة الإشكريشيا القولونية، إلا أن القطعة الجديدة لم يتم توصيفها من ناحية السمات الفيزيائية للجهاز، فهى كائن وهمى لا يوجد إلا من خلال الجهود البشرية فى المعمل. ويضاف إلى ذلك أنه بدلاً من أن يكون ناتجًا من تصميم إيجابى مبنى على نماذج كَمية لمكوناته، فإن هذا المحول للطاقة والذى يعمل بالضوء أُنتِج بتصنيع نسخ عديدة مختلفة ثم تم اختيار أصلحها للعمل[١٦]. ومع ذلك تم تحديد سمات الطاقة المزودة والطاقة المنتجة تحديدًا جيدًا عن طريق التجربة. ووجود هذه المعطيات التفصيلية، وليس الفهم الآلى للبروتين على المستوى الذرى، يشكل وصفًا كافيًا للقطعة الجديدة يتيح استخدامها فى تصميمات عقلانية للأجهزة والأنظمة.

كشاف الكافايين باستخدام الرنا

ابتعد فريق معهد كالتك عن فكرة التسلسل الهرمى بطريقة مثيرة للاهتمام. فبدلاً من الاعتماد على البروتينات كعناصر فاعلة، استخدم فريق كالتك الرنا.

ونتذكر من مناقشتنا للعقيدة الأساسية للبيولوجيا الجزيئية (الفصل الرابع) أن الأحماض النووية كان يُظن لسنوات عديدة أن وظيفتها لا تتعدى تخزين المعلومات ونقلها. وعلى شاكلة العديد من الحكايات التى تُحكَى عن البيولوجيا، يتوجب تعديل هذه الحكاية حيث أثبتت التجربة أن الرنا يستطيع، فى حقيقة الأمر، أن يؤدى وظائف مماثلة لوظائف كثير من البروتينات. وبوجه خاص، تستطيع بعض سلَسلات الرنا أن تنثنى مكونة تركيبات معقدة وتندمج مع جزيئات صغيرة، هى الكافايين فى هذه الحالة. وجمع فريق كالتك بين تلك وغيرها من تقنيات الرنا فى مجموعة من الجزيئات يمكنها أن تميز بين ثلاثة مستويات من الكافايين فى البن [١٧].

آى جِم سنة ٢٠٠٥

كانت سنة ٢٠٠٥ هى سنة أول مشاركة عالمية فى «آى جِم»، فشاركت فيه فرق من تورونتو بكندا؛ وكيمبردج من المملكة المتحدة؛ ومن زيوريخ بسويسرا. وبلغ عدد المشاركين مائة طالب مكونين ثلاثة عشر فريقًا من أربعة أقطار [١٨].

كما شهدت سنة ٢٠٠٥ أيضًا إدراك أن شهية الطلبة لتصميم قطع وأجهزة وأنظمة جديدة قد تجاوزت القدرات التكنولوجية لبناء كل تلك الأشياء. وذكرت مجلة «نيتشر» أنه "إذا لم تكن أىٌ من التصاميم قد نجحت نجاحًا كاملاً فالسبب يعود فى معظمه إلى محدودية علم البيولوجيا التخليقية، ذلك العلم الناشئ، أكثر من نقص الحماس أو الابتكارية أو بذل الجهد المضنى" [١٩].

كانت العقبة الكأداء سنة ٢٠٠٥ هي تجميع القطع في دارات لها وظيفة، ويرجع السبب في ذلك إلى أن شركات التخليق كانت لا تزال آنذاك تجاهد في سبيل تصنيع سلَسلات بطول الجينات. وبالإضافة إلى صعوبات التصنيع كانت هناك أمور أكثر تعقيداً في التصميم والمحاكاة. وكانت عروض الفرق لا تزال تتكون في غالبيتها من رسوم كبيرة وثرية لدارات ومحاكيات ولكن مع بيانات ضئيلة، مما يثبت مرة أخرى أن البيولوجيا التخليقية كانت صغيرة السن بالمقارنة مع البنية التحتية لتصميم دارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر التي كان منظمو مسابقة «آي جِم» يحاولون أن يلخصوها [٢٠]. وفي النهاية، قدمت الفرق مئات القطع الجديدة إلى سجل «القطع البيولوجية التقليدية»، رغم أن العديد منها لم يتم فحصه فحصًا كاملاً ولم يتم تحديد صفاته تحديداً تامًا. وذكر درو إندي آنذاك، "لا نعلم كيف نهندس أنظمة بيولوجية. ولا تستطيع أن تُدَرِّس شيئًا لا تعرف كيف تصنعه، ولهذا فالطلبة يساعدوننا في معرفة ذلك" [٢١].

آي جِم ٢٠٠٦

في ٢٠٠٦ توسعت المسابقة حتى شملت أربعمائة طالب من ثمانٍ وثلاثين مدرسة في أربعة عشر قطرًا [٢٢]. كما شهدت تلك السنة أيضًا بروز المسابقة إلى الصدارة، مع جوائز في فئات مختلفة. وكان الفريق الفائز بالجائزة الكبرى فريقًا من جامعة لوبليانا في سلوفينيا. وكان الفريق الوصيف الأول من الكلية الإمبراطورية بلندن، والوصيف الثاني من جامعة برنستون. أما الفئات المختلفة فشملت أحسن قطعة، وأفضل جهاز، وأفضل نظام، وأحسن تقديم، وأفضل تصدٍ للحظ العاثر وهو اعتراف صريح بصعوبة أن تجعل أي شيء يعمل [٢٣]. وأحيانًا كان القضاة يبتكرون جوائز إضافية. وفي حين نجح عدد من الفرق في إنتاج قطع وأجهزة جديدة وتحديد سماتها، لم يتمكن إلا عدد ضئيل من استكمال بنائها واختبارها. وتحسن بصورة مثيرة توصيل النتائج ونشرها، لأن كل الفرق تقريبًا قدمت نتائجها على صورة تقديمات، صارت الآن

موثقة على موقع «أى جم» على الشبكة العنكبوتية [٢٤]. وتم نشر أبحاث تتناول العديد من نتائج الفرق على مجلة على النت [٢٥].

رد الفعل المناعى المهندَس

قرر فريق لوبليانا ألا يعمل على الجراثيم مباشرة بل أن يبنى نظامًا فى خلايا بشرية يمكنه أن يساعد على فهم ما يحدث عند حدوث عدوى [٢٦]. وكان المشروع يستهدف دراسة رد فعل الجهاز المناعى البشرى للمُمْرِضات، وهى استجابة قد يحدث فى بعض الأحيان أن تخرج عن السيطرة وتصبح مبالغًا فيها. وهذا بدوره قد يؤدى إلى تفاقم الالتهاب والحمى، أى أعراض التلوث، الذى يقتل ما لا يقل عن أربعة وثلاثين ألف شخص سنويًا فى الولايات المتحدة، ويصيب ما يبلغ ١٨ مليون شخص كل عام على مستوى العالم، بنسبة وفاة تقارب ٣٠ بالمائة [٢٧].

التمايز المُبَرْمَج للخلايا الجذعية الجنينية

كان لفريق برنستون هدف متواضع هو تطوير "تقنية يُعتمد عليها لبرمجة تكاثر الأنسجة فى الأنظمة الثديية [٢٨]». وتمايز الخلايا الجذعية إلى أنسجة ذات وظائف هى عملية عسيرة على الفهم؛ ومثلما هى الحال فى بناء الطائرات، ثمة وسيلة للتوصل إلى فهم تعقيدات نظامٍ للسيطرة موجودٍ طبيعيًا وهى أن نستبدل النظام الذى ورثناه بنظامٍ مُهَنْدَس.

وكمشاركة فى هذا الجهد، شرع الفريق فى بناء سجل للبنات بناء بيولوجية للخلايا الجذعية يقتصر على الثدييات، ويحوى قطعًا تناسب استخدامها فى أنظمة توصيل فيروسية (أى تبادل المعلومات بين الفيروسات) . وعندما حل موعد تقديم المشاريع كان الفريق قد نجح فى إنتاج سبعين قطعة فاعلة من لبنات بناء ثديية. وعلى

غرار مشروع سنة ٢٠٠٥ الخاص بالتصوير الفوتوغرافى للجراثيم الذى قدمه فريق جامعة تكساس، كان هذا المشروع على درجة من التعقيد بلغت الاحتياج إلى مجهود عدة سنوات لتحقيق الأهداف الأصلية للتصميم. ويجرى فى الوقت الحالى تجهيز الأبحاث التى تتناول العمل للنشر[٢٩].

كاشف جرثومى للزرنيخ فى مياه الشرب

حمل طلبة جامعة إدنبرة معهم إلى أرض الوطن الجائزة الافتتاحية لأفضل تطبيق يناسب عالم الواقع لسعيهم فى سبيل بناء كاشف للزرنيخ فى مياه الشرب. ويُعتقد أن التسمم بالزرنيخ يصيب ما يقارب ١٠٠ مليون شخص على مستوى العالم. ويُقدر أن نحو ٢٠ مليون شخص فى بنجلادش وحدها يشربون مياهًا غير آمنة، من آبار محفورة دون قصد فى طبقة رسوبية غنية بالزرنيخ[٣٠]. وتستلزم الفحوصات الحالية للكشف عن الزرنيخ فى المياه إرسال العينات إلى معامل لإجراء تحاليل باهظة التكاليف، كما أن النتائج السلبية الخاطئة نسبتها مرتفعة. ويضاف إلى ذلك أن التحاليل الحالية يبلغ حد حساسية النتائج بها ٥٠ جزءًا لكل بليون جزء، وهى نسبة أعلى بكثير من النسبة التى توصى بها منظمة الصحة العالمية وهى لا تزيد على ١٠ أجزاء لكل بليون جزء.

وفى محاولة منهم لابتكار تحليل ميدانى زهيد التكاليف للزرنيخ بنى طلبة إدنبرة نظامًا كاشفًا اصطناعيًا داخل جرثومة الإشكريشيا القولونية. وفى حين أن الزرنيخ من الصعب اكتشافه مباشرة بطريقة كيميائية، فإن صنع مفتاح جينى يستثار بالزرنيخ يجعل الجرثومة قادرة على إصدار إشارة يمكن بسهولة قياسها باستخدام أصباغ بسيطة تقيس الرقم الهيدروجينى(pH).

وقد أثبت الطلبة أن الكاشف يمكنه اكتشاف الزرنيخ فى تركيزات تصل فى انخفاضها إلى ٥ أجزاء لكل بليون جزء. وكمتابعة للعمل الذى أنجزه فريق «آى جم

قام كريس فرنش، وهو خريج وأحد المشرفين على الفريق، بتحضير سلالة من جرثومة الإشكريشيا القولونية تحمل كاشف الزرنيخ ويمكن تجميدها لتسهيل الشحن بالسفن. وجارى التحضير لنشر النتائج، كما أبدت عدة شركات اهتمامها المبدئى بتسويق التجربة[٢١].

جراثيم بدون رائحة كريهة

صمم فريق مشروع «رائحة الإشكريشيا القولونية» نظامين يمكنهما تحويل الأيضات الذاتية (نواتج التمثيل الغذائى الذاتى) إلى المركبات المسئولة عن روائح نبات الشجيرة الكندية (wintergreen) ساليسيلات الميثيل (methyl salicylate) أو الموز «أسيتات الأيزوأميل: isoamyl acetate ». ومن أجل أن يُبَسِّطَ الفريق التصميم ويسمح بحل المشاكل ويتيح السيطرة على الأحداث إذا حدث أن قطعة من المكونات العديدة توقفت عن العمل، عمد الفريق إلى الالتزام بفكرة التسلسل الهرمى الذى ابتدعه درو إندى.

وكان النظامان يتكونان من جهازين لكل منهما. وكانت تعقيدات التصميم أمراً شاقًا. فمثلاً كان نظام الرائحة المُخَلَّق بيولوجيًا فى الشجيرة الكندية مكونًا من جهاز يطلق حمض الساليسيليك بتحويل الأيض الخلوى إلى حمض الساليسيليك، وجهاز آخر يحول الحمض إلى ساليسيلات الميثيل. وهذا الجهاز الأخير يمكن اختباره بإضافة حمض الساليسيليك إلى البيئة التى تنمو فيها الجراثيم، مما يجعلها بمثابة جهاز احتياطى إن حدث وتوقف الجهاز الأول عن إطلاق حمض الساليسيليك. وبالمثل، كان جهاز تخليق رائحة الموز اصطناعيًا مكونًا من جهاز يطلق كحول الأيزوميل وجهاز إطلاق رائحة الموز. وكان هذا النظام مصممًا بحيث يمكن إضافة إما كحول الأيزوميل أو ٣-ميثيل بيوتانال (وهو يتأيض طبيعيًا بواسطة جرثومة الإشكريشيا القولونية إلى كحول الأيزوميل) إلى البيئة التى تنمو فيها الجرثومة مما يتيح حل مشاكل تعطل جهاز إطلاق رائحة الموز.

وأدى جهازا إطلاق رائحة الشجيرة الكندية ورائحة الموز عملهما كما صُمما بمجرد تجميعهما.

نجح الفريق فى بناء وتجربة الأنظمة الاصطناعية للشجيرة الكندية. ولكنهم على الرغم من نجاحهم فى بناء أنظمة الموز الاصطناعية بكاملها فإن جهاز إطلاق كحول الأيزوميل فشل فى هذا السياق؛ ولم يعمل النظام إلا بعد إضافة كحول الأيزوميل فأنتج رائحة الموز. وبهذا لم يؤد التصميم النهائى عمله كما هو مقدر له، وكان من بين أسباب ذلك انتهاء الوقت المحدد، مثلما حدث مع فرق عديدة أخرى.

غير أنه حدث فى خلال أربعة أشهر أن فريقًا من طلبة «إم آى تى» تمكن من إنجاز تقدم كبير فى عمل هندسى كان قبل بضعة أعوام يشكل تحديًا خطيرًا لفريق من البيولوجيين الجزيئيين المحترفين. ويعود جانب من نجاحهم إلى وجود "سجل القطع البيولوجية التقليدية" وإصرار منظمى مسابقة «أى جِم» على العمل فى إطار فكرة التسلسل الهرمى. وقد يؤدى وصف هذا الجهد بأنه بناء مولدات لرائحة الشجيرة الكندية والموز إلى التهوين من شأن هذا الإنجاز. ولا يجب بأى حال من الأحوال أن نبخس من قدر إنجاز هذا الفريق. وسرعان ما صنع الطلبة نموذجًا أوليًا من جهاز معقد اصطناعى وأيضى مكون من ٢٤ قطعة مستمدة من أربعة كائنات حية. وعلى الرغم من كل عيوب مشروع «رائحة الإشكريشيا القولونية» فإنه يثبت عن حق أن الهندسة الإيجابية للأنظمة البيولوجية ممكنة وعملية.

آى جِم ٢٠٠٧

شهدت سنة ٢٠٠٧ مشاركة ٧٥٠ طالبًا من ١٩ قطرًا، مكونين أربعة وخمسين فريقًا[٣٢]. وكان من حسن حظى أنى شاركت كواحد من المحكمين الذين بلغ عددهم ما يقرب من العشرين. وكانت قواعد المشاركة وتسجيل الدرجات تتضمن ضرورة تقديم قطع وأجهزة جديدة إلى السجل بحلول موعد احتفال «أى جِم»، وتوثيقها (وليس

توصيفها توصيفًا كاملاً)، وإنشاء موقع على الشبكة العنكبوتية يحوى أوصافًا للنماذج والتصاميم وطرق العمل ونتائج التجارب.

وصل فريقان من الولايات المتحدة، واثنان من أوربا واثنان من الصين إلى الأدوار النهائية. وفاز بالجائزة الكبرى فريق جامعة بكين من مدينة بكين بالصين. وشملت الفرق التى وصلت الأدوار النهائية فرقًا من جامعة كاليفورنيا فى بيركلى؛ وجامعة كاليفورنيا فى سان فرانسسكو؛ وتحالفًا من معاهد فى باريس بفرنسا؛ وجامعة لوبليانا فى سلوفينيا؛ وجامعة العلوم والتكنولوجيا فى بيجينج بالصين.

دوائر التحكم فى تمايز الجراثيم

عرض الفريق الفائز بالجائزة الكبرى من جامعة بكين أجهزة جديدة للتحكم فى الأنشطة المكانية والزمانية لمزارع الجراثيم. وكان الهدف الرئيسى هو خلق القدرة على "التحكم فى سلوكيات أعداد كبيرة من الخلايا بمنحها المقدرة على التمايز من أحوال متجانسة والتفرق إلى مجموعات مع تقاسم العمل"[٢٣]. وبمعنى آخر، أراد فريق بكين أن يضع الأساس لبرمجة سلوكيات معقدة فتتحول إلى مجموعات من جراثيم وحيدة الخلية ومتماثلة جينيًا.

جرثومة مخلقة متعددة الخلايا

قرر فريق من معاهد متعددة من باريس أن يبنى مجموعة من المكونات فى جرثومة الإشكريشيا القولونية تحولها من جرثومة وحيدة الخلية إلى كائن متعدد الخلايا[٢٤]. ومثلما كانت الحال فى مشروع فريق بكين، كان الهدف هو إتاحة برمجة أنظمة تكاثرية معقدة. غير أن فريق باريس اختار أن يحقق هندسة التعقيد لا من خلال بناء دوائر متزايدة التعقيد فى خلية وحيدة – والتى قد تنتج عنها تفاعلات غير متوقعة

وغير مرغوب فيها مع تزايد التعقيد – ولكن من خلال بناء تعقيدات معيارية بها دوائر أكثر تبسيطًا فى خطوط خلوية مختلفة. ومع وجود أغشية خلوية الفصل بين الخلايا بصورة مادية، كان الهدف من الخطوط التخصصية للخلايا أن تتفاعل معًا بطرق محددة لإنتاج ظواهر معقدة.

دوائر منطقية قابلة للتوسع فى الجراثيم

فضل فريق جامعة العلوم والتكنولوجيا الصينية أن يطور إشارات جزيئية مستقلة جديدة لاستخدامها فى الدوائر الجينية. ونتذكر أن المفتاح الجينى والكابح المتذبذب (الفصل الرابع) استخدما بروتينات كابحة موجودة طبيعيًا كعناصر لتنظيم نسخ الدنا إلى رنا فى دوائر اصطناعية. والكوابح الجرثومية المستقلة الموجودة مسبقًا فى الطبيعة والتى تصلح للعمل كقطع عددها قليل، مما يقيد عدد أنظمة التحكم الحسابية التى يمكن أن تعمل بها.

حاول فريق جامعة العلوم والتكنولوجيا الصينية أن يعالج هذا الموقف. ومن خلال التصاميم النظرية والبحوث التجاريبة، باستخدام التطفر (mutation) والتطور، أنتج الفريق عددًا كبيرًا من البروتينات المخلقة الكابحة وغيرها من المكونات [٣٥]، (أثناء العرض الشفهى ذكر الفريق بشىء من السخرية أن "التوجه التجريبى مضيع للوقت حقًا". وهو قول صحيح).

الموقع، الموقع، الموقع

بنى فريق جامعة كاليفورنسا بسان فرانسسكو نظامين للتحكم المكانى فى تدفق المعلومات والمواد داخل الخلايا، وهو مشروع أطلقوا عليه عنوان «الموقع، الموقع، الموقع» [٣٦]، ويستحق هذا الفريق اهتمامًا خاصًا لأن هذه الجامعة ليس بها برامج

لطلبة مستوى ما قبل التخرج، فكان الفريق يتكون من طلبة المدارس الثانوية من سان فرانسسكو وبالو آلتو.

بنى الفريق نظامين. كان أولهما مرتبطًا بمشروع يجرى فى معمل وندل ليم، الذى كان يبحث فى كيفية بناء مسارات إشارات النقل باستخدام مركبات بروتينية. وثمة سمة مشتركة فى تلك المسارات هى وجود «بروتينات سقالية» (من سقالات البناء)، وهى عمود فقارى به مواقع لالتصاق أعضاء آخرين فى المسار. وجَمْعُ أعضاء المسار معًا على سقالة هى وسيلة لتنظيم ترتيب التفاعلات ومعدلها بواسطة التحكم فى التقارب الفعلى للمكونات من بعضها. ونجح الفريق فى إضافة وحدة قياس لمسار موجود فى نبات الخميرة منحته «زرارًا» جديدًا للسيطرة على إنتاجية المسار.

وكان النظام الثانى يتكون من الآليات اللازمة لبناء عُضيات (*)، اصطناعية (تخليقوسومات) (synthesome). وهو جزء مستقل ومنعزل يشكل فعليًا بيئة مصغرة يمكن استخدامها كمفاعل بيولوجى لإنتاج العقاقير أو الوقود. ويضاف إلى ذلك أن الفريق ابتكر طريقة للصق رقعة جزيئية معينة على العضية الاصطناعية يمكن استخدامها للتعرف عليها داخل الخلية. وهذه الرقعة يمكنها تحديد نواتج الأيض أو المركبات البروتينية كأهداف للعضية الاصطناعية. وعرض الفريق أجزاء من الآليات اللازمة لإنتاج العضيات، ولكن الوقت لم يسعفه لعرض التجميع الكامل أو عملية الاستهداف المحدد لمنتجات الأيض أو المركبات البروتينية.

(*) العُضيات (organelle) أجزاء تخصصية داخل الخلية مثل الميتوكوندريا والليزوسوم والريبوسوم وتعمل كأنما هى أعضاء داخل الخلية. (المترجم).

الدم البكتيرى

صمم فريق جامعة كاليفورنيا ببيركلى «الدم البكتيرى» ثم نفذوه، وهو نظام ينتج مادة الهيموجلوبين فى جرثومة الإشكريشيا القولونية وقد يستخدم يومًا من الأيام كبديل للدم فى حال الاحتياج الطارئ لنقل الدم [٣٧]، وكان الهدف من التصميم إنتاج بديل للدم لا يمتاز بسهولة تخزينه بعد تجميده بالتجفيف فحسب وإنما يمكن بسهولة إعادة تكوينه بأحجام كبيرة.

بدأ الفريق بأن شطب عدة جينات تشفر لتكوين بروتينات تتسبب فى تأثيرات سامة على البشر، وبهذا حما البشر من الجرثومة. وفى محاولة منه لإلغاء قدرة الجرثومة على النمو تمامًا داخل الجسم البشرى فقد ألغوا أيضًا الجينات التى تتيح للإشكريشيا القولونية أن تستولى على الحديد وتؤيضه. ثم ثنى الفريق بأن أضاف جينًا يمكن الإشكريشيا القولونية أن تبنى كبسولة وقائية حول نفسها، لأن الجهاز المناعى البشرى يتقن إتقانًا تامًا التعرف على المواد الغريبة وتدميرها، وبهذا تحمى الجرثومة نفسها من عائلها.

ثم زرع الفريق جينات تشفر لإنتاج الآليات التى تنتج مادة الهيموجلوبين وتساعد الجرثومة على التعافى من تأثيرات التجفيف بالتبريد. وشملت الدارات الإضافية إضافة بلازميد يشفر لإنتاج البروتينات التى تدمر جينوم الجرثومة ولكنه يترك خليتها سليمة. وتتحكم مفاتيحٌ فى كلٍّ من الآليات المنتجة للهيموجلوبين والتدمير الذاتى. وبهذا يمكن إعادة تكوين الجرثومة وتنميتها بأحجام كبيرة، وتستطيع إشارات خارجية أن تبدأ تزامنيًا إنتاج الهيموجلوبين وعملية التدمير الذاتى للجينوم. وكان المفترض أن هذه التركيبة تجعل من الجرثومة جوالاً خاملاً من الهيموجلوبين.

وأن نقول إن هذا المشروع ما زال أمامه الكثير حتى يصل إلى مرحلة التجربة الإكلينيكية هو قول من البدهى أنه يدرك كَمَّ الجهد اللازم قبل أن يصبح شىء مثل

الدم البكتيرى مستخدمًا فى البشر. وعلى الرغم من ذلك فقد بنى الفريق كل تلك المكونات وعرض العينات المجففة بالتبريد أثناء الاحتفال.

مصيدة الفيروسات

صمم فريق جامعة لوبليانا مسارين لمنع عدوى الخلايا البشرية بفيروس نقص المناعة الذاتية وهو الفيروس الذى يسبب مرض الإيدز [٣٨]، ولما كان هذا الفيروس يتحور كثيرًا فقد أراد الفريق السلوفينى أن يخلق آليات وقائية لا تكون خاصة بسلسلة فيروس بعينه ولكنها تتدخل ضد العدوى بالفيروسات عامة. ولا تنشط هذا الآلية الدفاعية التى أطلقوا عليها اسم «مصيدة الفيروسات» إلا عندما يلتصق فيروس الإيدز بالخلايا المستهدفة، بعد أن تستشعر الآلية إما (١) التصاق الفيروس بالقسم الموجود خارج الخلية من البروتينات المدمجة بغشاء الخلية، وهو شرط أساسى لإصابة خلية العائل بعدوى الفيروس، أو (٢) تنشيط بروتينات فيروسية معينة توجد فى الخلية بعد حدوث العدوى. ويمكن أن تؤدى أىٌ من الإشارتين إلى نسخ جينات تتسبب فى انتحار الخلية (apoptosis)، وهو استجابة طبيعية شائعة للعدوى، أو تؤدى إلى نسخ جينات يستخدمها الجهاز المناعى المقاوم للفيروسات والموجود داخليًا فى الخلية.

نجح الفريق فى بناء وعرض أجهزة تكشف التصاق فيروس الإيدز وأجهزة تكشف وجود بروتينات بروتييز الفيروس. كما عرض الفريق أيضًا أجهزة تتسبب عند استثارتها فى موت الخلية أو فى إطلاق استجابة مناعية. وتتسم الآليات التى تنفذ بها تلك الأجهزة الوظائف الموكلة إليها بالمهارة الفائقة، وتستحق أن تُفهم، غير أنها أيضًا على درجة عالية من التعقيد يجعلها خارج نطاق هذا الكتاب. وبالمثل، كان التحدى الهندسى العملى فى بناء وتجربة القطع المكوِّنة هائلاً ويخرج عن نطاق الحديث الحالى.

وسوف أبدو مقصراً إذا لم أدرك الإمكانيات المحتملة لدمج أنظمة لوبليانا مع تلك التى قدمها فريق جامعة برنستون سنة ٢٠٠٦. فالجمع بين دوائر سيطرة برنستون على التمايز المبرمج للخلايا الجذعية البشرية مع مصيدة الفيروسات قد يصبح أداة فاعلة ضد الأمراض. ومن الجلى أن هذا التوجه لا يخلو من الأخطار؛ فالخلايا الجذعية المعدلة جينيًا كانت سبب سرطان الدم (لوكيميا إكس-سيد) الذى جاء ذكره فى الفصل الثانى. ومع ذلك، وعلى الرغم من أن النتائج العملية من برينستون ولوبليانا بعيدة بعداً سحيقًا عن أن تتم تجربتها فى البشر، فإن التقدم الذى أحرزه طلبة جامعيون *لم يكن مجرد تخيل* استخدامات جديدة للخلايا الجذعية والمسارات الدفاعية، وإنما أيضًا بناء نماذج فاعلة من تلك الأنظمة مما يتيح للقارئ لحظة توقف للإثارة وسبب لها.

إنتاج الوقود الحيوى بواسطة الجراثيم

من الجدير بالذكر ما حدث سنة ٢٠٠٧، من أول ظهور لمشاريع تهدف إلى بناء أنظمة لإنتاج الوقود الحيوى داخل الجراثيم. ولم تتقدم أىٌ من تلك المشاريع وتصل إلى حد الإنتاج الفعلى للوقود، ولكنها زودت «سجل القطع البيولوجية التقليدية» بالعديد من القطع التى يمكن استخدامها فى مشاريع مستقبلية. وسوف أعود إلى تلك التقنية الواعدة فى الفصل الحادى عشر.

الخلاصة: حول فوائد وحتمية إدخال هندسة التعقيد فى البيولوجيا التخليقية

الدرس المستفاد من جهود المشاركين فى مسابقة «أى جم» هو أن إدخال هندسة التعقيد فى خدمة البيولوجيا الاصطناعية، ولو وفقًا للتعريف الذى حدده الفريق فى «إم أى تى»، لا تزال فى مرحلة طفولتها. فغالبية التصاميم لا تعمل، إما بسبب أن أغلب لبنات البناء البيولوجية ليست قابلة للتشكيل الكامل أو لأن سماتها لم تتحدد جيداً.

ونظراً لأن «أى جم» تستلهم مقرر «تصميمات لدارات مكونة من أنظمة بالغة الكبر» الذى كان يُدَرِّسُه لين كونواى، فإن استغلال بعض السياق من تاريخ الدوائر المدمجة يفيد فى قياس تقدم الطلبة فى بناء أنظمة بيولوجية تخليقية (٣٩)، ولقد مر ما يقرب من نصف قرن بين ظهور الترانزيستور وانتشار استغلال هذا الاختراع فى الدوائر المدمجة التى تغذى الإنترنت بالطاقة. ولم تظهر مسابقة «أى جم» و«سجل القطع البيولوجية المعيارية» إلا منذ سنة ٢٠٠٤. ولم يتم تحديد سمات إلا القليل من القطع «المعيارية»، ولم يُستكمل العديد من مشاريع الفرق المشاركة. وعلى الرغم من كل ما يقال، فإن الاستفادة من السجل قد اتضحت بالفعل من خلال إعادة استخدام الكثير من القطع والأجهزة التى عُرِضت من قبل فى مشاريع جديدة.

غير أن تلك الرؤية للهندسة البيولوجية - أى قطع لبنات البناء البيولوجى وأدوات التصميم الكَمى بوصفها أساس البيولوجيا التخليقية - تلك الرؤية هى حكايةٌ أخرى، وقياسٌ من الممكن أن يكون مفيداً فى فهم المسار الذى تتجه إليه التكنولوجيا. وفى حين مالت المناقشات السابقة بشدة إلى هذه الرؤية، فإنى سوف أعود فى الفصل التالى إلى مناقشةٍ للهندسة البيولوجية أكثر عمومية.

الفصل الثامن

إعادة برمجة الخلايا وبناء الجينومات

هناك حوضٌ مُزبِدٌ من الجراثيم النامية فى بيركلى بكاليفورنيا، قد يحوى مفتاح إنتاج علاج زهيد التكاليف للملاريا. ففى داخل ذلك الحوض نجد نبات الخميرة المعدل جينيًا يحرك بعنف السلف الكيميائى المباشر لمادة أرتميسينين (rtemisinin)، أقوى عقار ضد الملاريا فى ترسانة أسلحة البشر. ويمكن للسلف المسمى حمض الأرتميسينيك، أن يتحول بسهولة إلى عدة صورٍ مختلفة من العقار، سوف أطلق عليها هنا كلها من قبيل التبسيط اسم «أرتميسينين». ويُشفَى المرض من مقرر علاجى وحيد من سبعة أيام. وفى المناطق التى تتسم بضعف الالتزام بعلاج مدته أسبوع يمكن تقليص المدة إلى ثلاثة أيام بالجمع بين الأرتميسينين وعقاقير أخرى. كما أن العلاج الجمعى للأرتميسينين يشكل إستراتيجية للإبطاء من سرعة الارتفاع الذى لا مفر منه فى نسبة طفيل الملاريا المقاوم للعقاقير. ولسوء الحظ، هذا العقار فى الوقت الحالى باهظ الثمن بالنسبة لغالبية المصابين بالمرض وهو فوق طاقة حكوماتهم. وحتى بعد شفاء المريض يمكن للملاريا أن تعاود المريض بعد قرصات من البعوض الحامل للطفيل، مما يرفع من تكاليف العلاج على مستوى العام.

بدأ جاى كيزلنج، أستاذ الهندسة الكيماوية بجامعة كاليفورنيا فى بيركلى، وأستاذ الكرسى الجديد للبيولوجيا التخليقية فى معمل لورانس القومى ببيركلى، بدأ فى سنة ٢٠٠٠ مشروعًا لإنتاج الأرتميسينين من الجراثيم. واستخدم فريق كيزلنج ١٢

جينًا مأخوذة من ثلاثة جراثيم لبناء مسارٍ أيضى فى الخميرة، وهو عمل أكثر تعقيداً بكثير من غالبية جهود تعديل الجينات المعاصرة.

ووفقًا للطريقة التى اتبعها كيزلنج، فإن إنتاج العقاقير فى الجراثيم مشابه فى التركيبة والإجراءات لتخمير الجعة ويمكن التعجيل بها بحيث تنتج عقاقير خلال ساعات من بدء التشغيل. ومن المفترض، كإستراتيجية عامة، أن إنتاج العقاقير بواسطة الجراثيم سيحسن بصورة مثيرة من الحصول عليها وتخفض تكلفتها. وفى ديسمبر ٢٠٠٤ خصصت مؤسسة بيل جيتس وزوجته مليندا مبلغ ٤٢,٦ مليون دولار كمنحة لتحالف يجمع بين شركاء لا يبتغون الربح وشركاء تجاريين لتحقيق رؤية كيزلنج وتحويلها إلى واقع ملموس. وبعد أن أنفقوا المبلغ وحققوا المطلوب منهم فى المنحة الأصلية شرع هذا التحالف فى إبرام تحالف مع شركة سانوفى – أفنتيس للأدوية لتسويق التكنولوجيا. ويتوقع كيزلنج أن يحقق أهدافه بإنتاج الأرتميسينين بكميات كبيرة وبسعر منخفض بحلول سنة ٢٠١٠[١].

الأعباء الاقتصادية للملاريا وأهمية العلاج التخليقى

تظل التكلفة العقبة الرئيسية لانتشار استخدام العقاقير المضادة للملاريا. ولا تنفق العديد من الأسر المصابة أكثر من قروش فى اليوم على العقاقير، وفى الدول الموبوءة بتوطن الملاريا لا يزيد نصيب الفرد فى ميزانية الرعاية الصحية على بضعة دولارات أمريكية فى العام.

إن الأعباء الاقتصادية للمرض التى تتحملها الأسر فى حال من التراجع والنكوص. ويبلغ متوسط تكاليف علاج الملاريا لكل أسرة فى حدود ما لا يزيد على ٣–٧ بالمائة من الدخل، ولكن التكلفة الإجمالية وغير المباشرة للأسر الفقيرة قد تصل إلى ثلث الدخل السنوى[٢]، كما أن المرض يصيب الصغار بوجه خاص على نحو غير متناسب. وتصل نسبة الأطفال الأفارقة تحت سن الخامسة إلى ٩٠ بالمائة ممن

يقتلهم الطفيل؛ ووفقًا لتقارير منظمة الصحة العالمية يموت طفل من الملاريا كل ثلاثين ثانية تقريبًا[٣].

وإضافة إلى التكلفة الشخصية الصاعقة، يؤذى المرض مجتمعات بأسرها بما يسببه من كبح شديد للتنمية الاقتصادية. وفى الدول الموبوءة بالمرض، تؤدى الملاريا إلى انخفاض الناتج القومى الإجمالى بنحو ١,٣ بالمئة سنويًا[٤]، ويضاف إلى ذلك أن تلك الدول بها نحو ٤٠ بالمئة من سكان العالم. وعلى مدى الأربعين سنة الماضية، تسببت الخسائر التى أصابت التنمية فى حدوث فارق فى الناتج القومى الإجمالى يتجاوز بكثير البلايين التى تتلقاها تلك الدول كمعونة خارجية. وفى سنة ٢٠٠٠ قدرت منظمة الصحة العالمية أنه لو كانت خسائر التنمية تلك قد استُبعِدت سنة ١٩٦٥ لترتبت على ذلك زيادة "تربو على ١٠٠ بليون دولار أمريكى تضاف إلى الناتج القومى الإجمالى لدول أفريقيا جنوب الصحراء، والذى بلغ ٣٠٠ بليون دولار (سنة ٢٠٠٠). وهذه المائة بليون دولار الإضافية تعادل ما يقارب خمسة أضعاف كل المعونة التنموية التى مُنحت لأفريقيا (فى سنة ١٩٩٩)[٥]".

ونظرًا لعدم وجود وسيلة تقنية للقضاء على الطفيل فى منتصف القرن العشرين، فمن الجلى أن ذلك الرقم قد تم وضعه لإحداث تأثير مبهر أو للتسبب فى صدمة، ولكن الأمر هو أن خسائر التنمية مستمرة فى التفاقم. ولو كانت الملاريا قد تم القضاء عليها سنة ١٩٦٥ لكان الناتج القومى الإجمالى لدول جنوب الصحراء الأفريقية قد زاد بنحو ٣٥ بالمائة سنة ٢٠٠٨ عما هو عليه اليوم. وتعتقد منظمة الصحة العالمية أن الناتج القومى الإجمالى فى الدول الخالية من الملاريا أعلى فى المتوسط للفرد الواحد بثلاثة أضعاف عن الدول التى تتوطن فيها الملاريا[٦]، وتنخفض إنتاجية المزارعين فى الدول الموبوءة بالملاريا بنسبة تبلغ ٥٠ بالمائة من جراء أيام العمل الضائعة بسبب المرض[٧]، ولهذا فسوف تكون لإنتاج عقار زهيد الثمن وفاعل ضد الملاريا تأثيرات عميقة.

وتحسين الحصول على التقنيات الأخرى مثل ناموسيات السرير المعالجة بالمبيدات الحشرية لها مردود هائل فى تخفيض معدل العدوى. غير أن الضحايا المصابين لا يزالون يحتاجون العلاج. وقد يوجد منع العدوى فى صورة لقاح، وهو الشيء الذى تموله أيضًا مؤسسة جيتس. ولكن أقوى اللقاحات المضادة للملاريا تؤثر فيه بصورة جزئية فقط وتتكلف أكثر من الأرتميسينين. وسوف يغير الأرتميسينين المنتج من الجراثيم من تأثير الملاريا على بلايين الأفراد على مستوى العالم.

وحاليًا يُستخرج الأرتميسينين من شجرة الأفَسنتين وكان يستعمل بوصفه علاجًا عشبيًا لما لا يقل عن ألفى عام. وقد تحدث العلماء الصينيون عن فاعليته ضد الملاريا لأول مرة سنة ١٩٧١[٨]، وأُعلن عن العقار وخواصه الأقرباذينية سنة ١٩٧٩، وإن كانت الآليات الجزيئية لفاعليته لا تزال غير مفهومة. ونُشرت طريقة لتصنيعه كيميائيًا سنة ١٩٨٣، ولكنها ما زالت "طريقة شاقة ومطولة وغير مجدية اقتصاديًا"[٩].

ولما كان الأرتميسينين الطبيعى من المنتجات الزراعية فإنه يتنافس مع المحاصيل الغذائية على الأراضى الصالحة للزراعة، وهو عرضة للتقلبات الموسمية فى المحصول، وتكلفته تحددها بصورة جزئية أسعار السماد والوقود. ونتيجة لجهودات كيزلنج ورفاقه يبدو أنه فى غضون سنوات قليلة سوف تنجح التكنولوجيا البيولوجية فى إنتاج عقار أكثر مرونة وأقل تكلفة من العقار الموجود حاليًا. وسوف يبدأ الإنتاج التجارى لعقار الأرتميسينين سنة ٢٠١٠، بإنتاج سنوى مستمر يكفى لعلاج الخمسمائة مليون مريض بالملاريا الذين يصابون سنويًا[١٠].

تخمير العقاقير العلاجية

إن النهج الذى سار عليه كيزلنج بهندسة مسار أيضى هو نفسه من حيث المبدأ النهج الذى تسير عليه مشاريع هندسية أخرى: فقد بدأ بتفتيت المشكلة إلى مشاكل صغيرة يمكن حل كل منها على حدة. وهو بهذا لا يختلف عن أسلوب بناء

السيارات والطائرات والحواسب، بل حتى المشاريع الطلابية لمسابقة «آى جم» (أنظر الفصل السابع).

غير أنه خلافًا لأسلوب البدء من الصفر الذى اتُّبِع فى مسابقة «آى جم» باستخدام قطع بناء قابلة للتشكيل، لا يملك كيزلنج وزملاؤه حتى الآن وسيلة للحصول على مكونات منفردة لمسار تكون لها مواصفات فيزيائية محددة للأداة. ويضاف إلى ذلك، ومع الخسائر البشرية المستمرة للملاريا، لا يملك الفريق ترف الانتظار حتى تُبتَكَرَ تلك المكونات. وعلى أعضاء الفريق أن يبتكروا أولاً بأول. ولكى يعالجوا مشكلة بشرية ضخمة فإنهم مضطرون إلى بناء مسار جديد يكون ذا فاعلية من الناحيتين التقانية والاقتصادية، مستخدمين فى سبيل ذلك أية أدوات ومكونات يستطيعون أن يجعلوها صالحة للعمل.

ونذكر على وجه الخصوص أنه عندما بدأ المشروع كانت سلْسَلات مكونات جينات الأرتميسينين فى شجرة الأفَسنتين متاحة إلكترونيًا، ولكن جينًا أساسيًا لم يكن موجودًا على صورة دنا. ولهذا عمد فريق كيزلنج إلى استخدام نسخة من ذلك الجين من نبات آخر تعرفوا عليه من قاعدة بيانات خاصة بالسلْسَلات. وتم تخليق الجين من الصفر وتجهيزه ليكون أكثر ملاءمة لكشف المعلومات المشفرة فى نبات الخميرة (انظر الفصل السادس)، ونتيجة لهذه الخطوة وحدها تحسن محصول التحويل المركب الأولى إلى أرتميسنين بمقدار عدة مئات الأضعاف[١١].

احتاج اختيار نبات الخميرة ليكون عائلاً لمسار تخليقى إلى إعادة دقيقة لهندسته. وأُخذت ثمانية من الجينات الاثنى عشر فى المسار التخليقى من نبات الخميرة. وبهذا احتاج بناء مسار جديد فى الخميرة إلى توازن بين استخدامات تلك الجينات فى موطنها الأصلى مع الاستخدام التخليقى. وفى بعض الأوقات، عندما تباطأ التقدم من جراء تعقيدات العمل فى الخميرة، أجرى الفريق تجارب فى جرثومة الإشكريشيا القولونية للتطوير ولحل المشاكل ثم عاد بالدوائر الناتجة إلى الخميرة.

ولما كان ذلك مشروعًا هندسيًا فلربما يتوقع المرء أن يكون النموذج الرياضياتى ذا فائدة فى تطويع المكونات المختلفة للعمل. ولسوء الحظ، وكما يتضح من النصف الأول من هذا الكتاب، فإن بناء نموذج دقيق ليساعد على هندسة الأيض حتى فى الجراثيم ما زال عملاً مضنيًا. ويذكر كيزلنج أنه فى حين كان تصنيع نموذج لتدفق المواد مفيداً أحياناً كدليل لدولبة (منابلة) الأيض الأساسى والتلاعب به، إلا أنه لم يجده مفيداً فى هندسة المسارات الخطية مثل ما هو مطلوب لإنتاج حمض الأرتميسينيك[١٢]. غير أنه من الجلى أن الفريق لم يدع نقص نموذج مفصل يعوق تقدمه. ويضاف إلى ذلك، أنه على النقيض من المشاركين فى مسابقة «آى جِم»، لم يجد الفريق سجلاً بالقطع المعيارية يأخذون منه، ولم يكن ثمة من بروتوكول معيارى للتجميع، وكذلك لم تكن أمامهم أفكار للتسلسل الهرمى يستعينون بها فى التصميم والبناء وحل المشاكل.

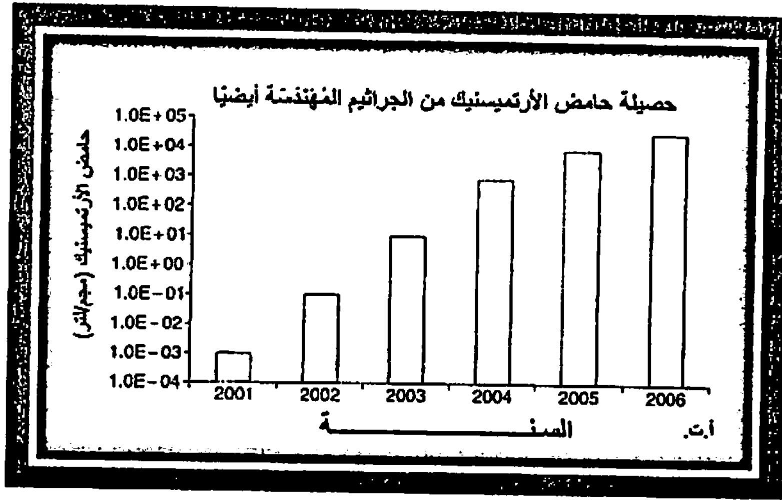
ويمكن تعريف الهندسة الأيضية بتصرف بأنها استغلال كل الأدوات والوسائل المتاحة لبناء كائنات تستطيع تخليق المركبات المطلوبة أو المساعدة على ذلك. وفى حين قد يكون النظام الناتج مفهومًا بدرجة أقل من النظام الذى ينتج من بناء يبدأ من الصفر بطريقة هندسة التعقيد التى ابتدعها توم نايت، وكذلك فى حين أن سلوك القطع المنفردة المستخدمة فى البناء قد تكون أقل تحديداً فى صفاتها من قطع لبنات البناء البيولوجية، إلا أن الهدف من الهندسة الأيضية هو إتمام العمل بصرف النظر عن كل تلك الاعتبارات.

ويتضح من وصف كيزلنج لهذا العمل مدى الصعوبات والخصوصية التى تكتنف التحديات الهندسية. واللعب العبثى فى المسارات له آثار جانبية محيرة، ويحتاج الأمر إلى مجهود شاق للخروج بنظام ذى فاعلية.

ولقد كان على فريق كيزلنج أن يكيفوا كل خطوة فى المسار لكى تؤدى عملاً داخل الخميرة. ونتيجة لذلك، ليس من المحتمل أن المسار يمكن أن يُوَجَّهَ إلى عائل آخر. ويضاف إلى ذلك أن كثيراً من الخطوات التالية كان بمحض المصادفة؛ ففى مرحلة

من روايته عادة ما يعلق كيزلنج قائلاً: "وعند هذه النقطة بدأت مجموعة من المعجزات تحدث فى المعمل متزامنة فى نفس الوقت"(١٣). ومن المؤكد أن تلك المعجزات نالت ترحيبًا، ولعها كانت ضرورية لإحراز تقدم، وربما فُهمت بعد الاسترجاع التذكرى للأحداث الماضية، غير أنها كانت كلها غير مخطط لها. ويؤكد ذلك مرة ثانية الاختلافات بين البيولوجيا والمجالات الأخرى التى ترسخ فيها التصميم التنبؤى بصورة أفضل. غير أنه على الرغم من محدودية القدرة على البناء وفقًا لتصميم، نجد أن التقنيات البيولوجية تسهم إسهامًا كبيرًا فى الاقتصاد كما سنرى فى الفصل الحادى عشر. ولكن تلك الإسهامات فى الوقت الحالى تأتى ومعها تكاليف الاستثمار الكبير فى العمالة.

وفى مخطوطة تصف مشروع «رائحة الإشكريشيا القولونية» ذكر فريق «أى جم» التابع لمعهد «إم أى تى» من سنة ٢٠٠٦ (انظر الفصل السابع) "أنه فى حين نجح المهندسون الأيضيون فى بناء مسارات تخليقية بيولوجية مبتكرة فى الجراثيم الصناعية بهدف إنتاج مركبات مفيدة تجاريًا ... إلا أن تلك المنجزات الهندسية تحتاج لاستثمارات هائلة فى العمالة والوقت ورؤوس الأموال بواسطة مهندسين جينيين معروفين عالميًا. وهذه الاستثمارات الكبيرة ليس لها ما يبررها بصفة عامة إلا إذا كان المُنتَجُ طاغيًا على نحو ساحق من منظور الناحية التجارية أو الرعاية الصحية"(١٤). وكانت مجموعة كيزلنج قد استثمرت بالفعل عشر سنوات شخصية من الجهد على المشروع، بل وأنفق المشاركون التجاريون ما يفوق ذلك. وفى حين أنتج كل ذلك العمل زيادة فى إنتاج الأرتميسينين بلغت ما يقرب من بليون ضعف بالمقارنة مع التجارب الأولية التى أجريت سنة ٢٠٠١ (شكل ٨-١)، إلا أن الإنتاج التجارى لكى يكون مجزيًا يحتاج إلى ما يقرب من مائة ضعف إضافية(١٥).



شكل (٨-١) زادت حصيلة حامض الأرتميسنيك المنتَج من الخميرة ما يقرب من بليون ضعف فى ست سنوات.

وحاليًا تقدم البيولوجيا التخليقية بالفعل دعامة للمهندسين المهتمين باستخدام البيولوجيا فى بناء أنظمة ذات قيمة تجارية أقل وضوحًا أو أقل فوريةً. غير أنه فى نهاية المطاف نجد أن المقدرة على تكوين دوائر جديدة باستخدام كل ما فى الجعبة من أدوات هندسة التعقيد يمكن أن تؤدى إلى تحسن هائل فى القدرة على بناء أنظمة بيولوجية جديدة. ويتطلع كيزلنج أيضًا إلى المستقبل بحثًا عن عناصر تحكم تخليقية مبتكرة، ويقترح أن البيولوجيا التخليقية، من خلال استخدام القطع القابلة للتشكيل، ستكون أساسية فى تقليص الجهد المطلوب حاليًا لبناء دوائر جينية تخليقية(١٦).

وثمة صعوبة متأصلة فى بناء دوائر جديدة فوق تلك الدوائر التى أنتجتها الطبيعة، وهى لا تقتصر على أن غالبية الدوائر ليست معزولة عن أيض العائل فحسب وإنما أن

العائل ذاته عادة ما لا يكون مفهومًا فهمًا جيدًا بوصفه منصة عمل. وترتبت على ذلك محاولات إنتاج كائنات ذات جينومات بسيطة نسبيًا يمكن أن تعمل كعائل قابل للبرمجة.

الهيكل (الشاسيه) ومصدر الطاقة

إن أردت أن تبنى حاسبًا من الصفر، فإنك بزيارة سريعة لمتجر إلكترونيات سوف تخرج بهيكل (شاسيه) به مصدر للطاقة. وهذا الصندوق مجهز بتجهيزات معيارية للمكونات مثل سواقات الأقراص واللوحة الأم (motherboard) أو كارت الرسومات وتجهيزات تتيح تثبيت ما يعن لك من شذرات وقطع. وتوجد الهياكل بأشكال وأحجام مختلفة وبها مصادر للطاقة تناسب شدة التيارات الكهربية المختلفة. ومن الداخل، تمتلئ الهياكل بوصلات مختلفة للاتصالات بين لوحات الدوائر وثقوب البراغى التى تناسب مقاسات تلك الألواح.

وجرثومة الإشكريشيا القولونية هى حاليًا الهيكل المفضل للمشاريع المختلفة للبرمجة البيولوجية. ولسوء الحظ، وعلى الرغم من أن الإشكريشيا القولونية كائن بسيط بدرجة مقبولة فإنها مع ذلك تحوى العديد من الجينات التى لم يتم تحديد صفاتها. ومن بين ما يقرب من أربعة آلاف جين الموجودة فى أكثر سلالات الجرثومة شيوعًا فى استخدامها فى المعامل، نجد أن أكثر من ١٠ بالمائة منها لم يتم تحديد وظائفها[١٧]. وثمة دراسة حديثة هدفها تقليص تلك الشكوك، وذلك بمقارنة السلالات المختلفة للإشكريشيا القولونية – وجُمعت تلك السلالات من بيئات مختلفة وتحوى أعدادًا متباينة من الجينات – لتحديد جينوم أساسى أصغر، وبذلك تلقى الأضواء على الجينات «الدخيلة» التى لا تظهر فى كل السلالات. وبعد ذلك تم إلغاء تلك الجينات الدخيلة من السلالة التى تحوى أقصر جينوم. ونتج عن ذلك كائن جديد، تم تقليص طول جينومه بنحو ١٥ بالمائة، فصار يحوى أقل من ٤ ملايين قاعدة، ويسوق الآن تجاريًا تحت اسم «الإشكريشيا القولونية ذات الجينوم النظيف»[١٨] (Clean Genome E. coli).

وليس واضحًا ما ينتج عن ذلك الإلغاء من تغيرات وظيفية، ربما لأن العديد من التفاعلات بين البروتينات «لا تزال غامضة» فى الإشكريشيا القولونية(١٩)، وكان من بين الأهداف الرئيسية للمشروع القضاء على الجينات التى تتسبب فى الطفرات وتغيير تنظيم الجينوم كاستجابة للتوتر. وبالإضافة إلى السمات المفيدة المتوقعة لازدياد استقرار الجينوم، فإن السلالة (ويا للسخرية) تظهر بها، دون توقع، سمات أخرى «جديدة ومحسنة» فيما يتعلق باستخدامها كهيكل. كما أن «الإشكريشيا القولونية ذات الجينوم النظيف» يظهر بها تعاظم فى القدرة على الثقب الكهربى (electroporation) (انظر الفصل الثانى)، وعندما يتم إدخال بلازميدات فإن الاحتمال الأكبر أنها سوف تستمر فى فاعليتها بدرجة أكبر مما يحدث فى السلالات الشائعة الاستخدام فى المعمل.

ولعل هذه التغيرات تعود بفائدة على الجهود الهندسية، وربما يتحول الهيكل إلى نجاح تجارى. ولكنه ما زال يحمل أكثر من ٣٦٠٠ جين، والبرنامج الذى يديرون به شئون الخلية أبعد ما يكون عن الفهم. وتشير حقيقة أن بعض السمات الجديدة ما زالت تحتاج للشرح والتوضيح، تشير إلى وجوب السعى إلى صنع هيكل به تعقيدات أقل.

ويدرك رينتر توم نايت من معهد «إم آى تى»، ويشتمل جزء من عمله على إعادة تكوين قوة الدائرة الهندسية فى تصميمات لدوائر بالغة الكبر من قطع لبنات البناء البيولوجية (انظر الفصل السابع)، يدرك تمام الإدراك أن الجهود قد تستفيد من هيكل ذى واجهة تقليدية وسلوك يمكن التنبؤ به. ويقضى توجهه ببناء «أصغر جينوم» وذلك بالبدء بجرثومة جد بسيطة ثم يجعلها أكثر بساطة بإلغاء كل الجينات التى لا لزوم لها للأيض والنمو الأساسيين للجرثومة.

والهيكل المفضل عند نايت هو جرثومة غير مؤذية تسمى «ميزوبلازما فلورم» (Mesoplasma florum). وهى جرثومة غير مُمْرِضة لأى كائن حى معروف، ولا تحوى سوى بضع مئات من الجينات، وتنمو بسرعة فى المعمل. وحديثًا تعاون نايت مع الإدارة

المتخصصة فى سَلسَلة الجينومات فى «معهد برود» لاستكمال سَلسَلة هذه الجرثومة. ونظراً لما بلغته الأتمتة التى تعمل بها عملية السَلسَلة، فلم يستغرق إنجاز غالبية العمل سوى ساعتين (انظر الفصل السادس). ويصف نايت بسخرية رد الفعل لطلبه سَلسَلة كائن به ٨٠٠,٠٠٠ قاعدة «فقط»: "بالتأكيد يا توم، سوف نسلسله لك، ولكن ماذا نفعل بالوقت المتبقى من استراحة تناول القهوة؟"[٢٠].

وبعد أن حقق نايت تخليق الجينوم الكامل، فإنه سوف يشرع فى تبسيط التعليمات الموضوعة للمحتوى الضئيل للجرثومة. ويخطط نايت "لإعادة تصميم جينوم هذا النوع من الجراثيم من الصفر، بهدف خلق كائن مفهوم تمام الفهم ومصنوع ببراعة تناسبه كقاعدة حية مبسطة لفرع المعرفة الهندسى الوليد للبيولوجيا التخليقية"[٢١].

وإعادة التصميم هذه هى تجربة فى حد ذاتها، لأنه ليس من الواضح حتى الآن كيف ستتفاعل هذه المجموعة الافتراضية من الجينات على إقامة أود الحياة. كما أنه ليس من المعروف كم سيستغرق المشروع وما إذا كان إلغاء الجينات سوف ينتج عنه الهيكل المبسط الذى يتوقعه نايت.

الجينومات التخليقية

يريد كريج فنتر، الذى اشتهر بإسهاماته فى سَلسَلة الجينوم البشرى، أن يبنى من الصفر جينومات كاملة قادرة على أداء وظائف. ففى أوائل ٢٠٠٨ نشر فريق من معهد ج. كريج فنتر بحثاً فى مجلة «ساينس»، يصفون فيه أول تخليق كيميائى وتجميع لكروموسوم جرثومى كامل[٢٢]. وذكرت المقالة، التى كان دان جيبسون مؤلفها الأول، طريقة لتخليق كروموسوم يحتوى على ما يربو من ٥٨٠,٠٠٠ قاعدة من جرثومة تسمى «ميكوبلازما جنيتاليوم» (م. جنيتاليوم) (Mycoplasma genitalium) ولكن بدون ذكر استخدامات ذلك الكروموسوم لتشغيل الخلية.

كان الهدف من تلك الجهود هو التمكين «لتخليق الجينومات»، وهو الأمر الذى يحدده كلايد هتشينسون عضو الفريق بأنه "التخليق الكيميائى للجينومات وتثبيتها داخل الخلايا"[٢٢]. وثمة اختلاف ماكر بين هذا الهدف والبيولوجيا التخليقية كما تحددها غالبية الممارسين، التى هى ليست بالضرورة بناء جينومات كاملة فاعلة وإنما بناء دوائر تخليقية بيولوجية جديدة لتحقيق أهداف معينة، سواء كانت بهدف فهمٍ أعمق أم لتأثيرات اقتصادية. ولا تتكون غالبية تلك الأنظمة سوى من جينات قليلة، وبهذا فهى أصغر بكثير من الجينوم التخليقى الكامل الذى ينشده فنتر وفريقه.

ومن المناسب أن نتفهم بعضًا من التفاصيل الفنية والاقتصادية لمشروع م. جنيتاليوم التخليقى، لأن جهود البناء كانت وسيلة يُستَنَدُ إليها فى تقدم تقنيات أقوى فى أواخر ٢٠٠٨.

طلب جيبسون ورفاقه تسليم ١٠١ قطعة من الدنا، يبلغ طول كل منها نحو ٦ كيلوقاعدات، وطلبوا ذلك من ثلاثة موردين تجاريين مختلفين ثم طوروا طريقة للتجميع المتوازى لتلك القطع فى الجينوم المكون من نحو ٥٨٠,٠٠٠ قاعدة فى خطوات قليلة. وبدأوا بتجميع القطع المُوَرَّدَة تجاريًا فى خمس وعشرين قطعة أكبر باستخدام طرقٍ تقليديةٍ (أطلق عليها المؤلفون اسم «المجموعة-أ»). وأتبعوا ذلك بجولتين من التجميع نتج منهما أربع قطع كبيرة من شظايا مكونة ربع جينوم هى «المجموعة-ج»). وفى الخطوة الأخيرة، تم تجميع قطع الربع جينوم الأربع متجاورةً فى جينوم صحيح داخل عائل من الخميرة مستغلين فى ذلك آليات العمل فى الدنا الخاص بالكائن. وهى آليات ليست مفهومة تمام الفهم، ولكن من الجلى أن البشر يمكنهم استغلالها فى تجميع قطع طويلة من الدنا. وثمة فائدة رئيسية لهذه الطريقة، وهى أن إدخال المزيد من التكنولوجيا البيولوجية فى العملية يقلل من حجم التعامل البشرى مع القطع الطويلة الهشة من الدنا.

وفى حين لم تتناول مقالة جيبسون مباشرة موضوع التكاليف، إلا أن المرء يستطيع، مع أخذ الأسعار السائدة فى الاعتبار، أن يقدر أن الفريق ربما يكون قد

أنفق ما بين نصف مليون ومليون دولار على تخليق الدنا فقط. وتقديراتى حول العمالة التى احتاجها تطوير باقى تقنيات التجميع أنها فى حدود خمس سنوات للشخص الواحد (على الأقل) على مدى عدة سنوات. وتصل تكاليف التفرغ التام لعالم يحمل درجة الدكتوراه، بما فى ذلك مرتبه والمزايا التى يتمتع بها وتكاليف المعمل، تصل إلى نحو ٢٥٠,٠٠٠ دولار سنويًا فى الولايات المتحدة، مما يعنى أن جهود تطوير التجميع تضيف مليونًا وربع مليون دولار إلى تكاليف المشروع. وذلك يصل بإجمالى التكاليف إلى ٢ مليون دولار، لتجميع تجريبى واحد.

ويذكر كلايد هتشيسون أن "فهم لغز البناء استغرق عدة سنوات"، وبعد ذلك الجهد ما زالت الآلية التى يُجَمِّعُ بها نبات الخميرة الجينوم التخليقى، "غامضة بعض الشىء"[٢٤]. وعلى الرغم من تلك الشكوك، فإن النجاح فى تجميع شظايا ربع الجينوم فى كروموسوم كامل أدى بالفريق إلى التساؤل عما إذا كان نبات الخميرة يستطيع إنجاز المزيد من العمل.

وفى أخريات ٢٠٠٨، برهن دان جيبسون وزملاؤه أن الخميرة يمكن استخدامها لتجميع قطع «المجموعة-أ» الخمس والعشرين مكونة كروموسومًا كاملاً لجرثومة م. جنيتاليوم فى خطوة واحدة[٢٥]، ولم يستغرق التجميع سوى ثلاثة أيام، انقضت غالبيتها فى انتظار الخميرة حتى تنمو. وفى بحثهم المنشور يتساءل الفريق عما إذا كان فى الإمكان تجميع الجينوم مباشرة فى الخميرة من الشظايا المائة وواحد الأصلية. ومن غير المحتمل أننا سننتظر طويلاً حتى نكتشف ذلك. ولعله من المرجح أن الخميرة تستطيع بناء كروموسوم اصطناعى بحجم عدة ملايين من القواعد، أى فى حجم كروموسوم الخميرة ذاته.

فإن تأيدت تلك التخمينات فى المعمل، فستكون النتيجة ظهور وسيلة تتيح تجميع كروموسومات فى حجم «الإشكريشيا القولونية ذات الجينوم النظيف». ولما كانت التفاصيل لا تزال "غامضة بعض الشىء"، فقد تُكتشف فيما بعد قيود تُحَجِّمُ من نوع السَلسَلات التى من الممكن تجميعها بنجاح. ورغم ذلك، ومع وجود صناعة

واسعة الانتشار تنتج بصورة منتظمة شظايا من الدنا المُخلَّق يبلغ طولها ٥-١٠ كيلو قاعدات، فإن التجميع السريع فى الخميرة سوف يضع القدرة على بناء تنوع واسع من جينومات الدنا فى أيدى العلماء ورجال الأعمال وغير ذلك من الفئات التى تبدى اهتمامًا فى كل أرجاء العالم. ومما لا ريب فيه أن كريج فنتر يفكر وفقًا لهذا النمط: "إن ما نفعله إزاء الكروموسوم التخليقى سوف يكون إطار التصميم المستقبلى"(٢٦).

وقد أنتج فريق معهد فنتر بالفعل نسخة مصغرة من جرثومة م. جنيتاليوم بإلغاء كل الجينات تجاربيًا، واحدًا فى كل مرة، ثم التخلص من الجينات التى وجدوها غير ضرورية تحت ظروف نمو معملية معينة(٢٧)، ولو كان الجينوم المصغر الناتج قد بُنى من الصفر، لنتج عن تشفير الجرثومة، التى يطلق عليها فنتر اسم «ميكوبلازما لابوراتوريوم» (Mycoplasma laboratorium)، احتواؤها على ٣٨٢ جينًا فقط من أصل ٥١٧ جينًا وقد ينتج عن ذلك هيكل آخر مثير للاهتمام(٢٨).

فوائد تخليق الجينومات

ليس واضحًا ما إذا كان تخليق جينات متكاملة سوف تترتب عليه نتائج اقتصادية فورية. وسوف تظل جهود البناء التى تستخدم الخميرة محتاجة لشراء قطع طويلة عديدة الدنا التخليقى، والذى سيستمر سعره مرتفعًا لسنوات قادمة (انظر الفصل السادس). ولذلك فمن الأرجح أن جينومًا مصغرًا من نوع ما - تم تخليقه إما بالتخليق أو من خلال الإلغاء - سيظل مستخدمًا كهيكل فى المستقبل المنظور وتتم تنميته بالوسائل التقليدية، مع قصر استخدام التخليق على إنتاج برمجة حسب الطلب.

وقد يكون مفيدًا هنا أيضًا استخدام تجميع الدنا فى خطوة واحدة فى الخميرة، لتوفير أداة للتجميع السريع لمسارات أيضية من سَلسَلات قصيرة من الدنا. ولقد أثبت

زنجى شاو ورفاقه من جامعة إلينوى بالضبط نجاح هذا النمط من الاستخدام فى أخريات ٢٠٠٨[٢٩]. فقد جَمَّعَ الباحثون مسارات أيضية فاعلة من ثلاثة وخمسة وثمانية جينات تم عزلها، جَمَّعُوها فى عملية من خطوة واحدة، وتكاد تماثل تلك التى صنعها معهد فنتر. ومن الممكن استغلال التجميع فى الخميرة، إذا استُخدِم مع مكتبات لتنوعات الجينات، حيث يمكن أن تتنوع سَلسَلات كل جين فى مسار تخليقى فى نفس الوقت، من الممكن استغلال التجميع فى الخميرة للكشف فى نفس الوقت عن عشرات الألوف من الطفرات المختلفة فى جينات مختلفة. وسينتج من ذلك توفر أداة قوية تضاف إلى تقنيات الهندسة الأيضية الموجودة حاليًا مع احتمالات الإسراع فى التعرف على الجينات المفيدة والمسارات البديلة.

غير أن وراء التكاليف البسيطة لتجميع الدنا ثمة تكاليف العمالة التى يتطلبها فهم وبناء المسارات الأيضية الجديدة بقيمة اقتصادية. ويسلط عمل جاى كيزلنج على الأرتميسينين الأضواء على الصعوبات التى تكتنف نسج مسار معقد فى جينوم موجود، وبخاصة عندما تتشارك المسارات الجديدة مع العائل فى الجينات والوسائط الأيضية. وما لم تُتِحْ القطع القابلة للتشكيل انفصالاً حقيقيًا بين وظائف الهيكل وبرمجة الدوائر، فإن البروتينات الاثنى عشر أو نحو ذلك التى أظهرها مسار الأرتميسينين ربما تكون سقفًا عمليًا أعلى يحد من قدرات الهندسة فى المستقبل القريب.

وعلى مستوى المستقبل الأطول قليلاً، فإن العدد الأكثر إثارة للاهتمام فى التخليق لن يزيد إذن على عشرة جينات إلى خمسين جينًا وعشرة آلاف إلى خمسين ألف قاعدة. وربما تكون الدوائر الجينية من هذا الحجم هى الحد الأقصى للأنظمة ذات القيمة الاقتصادية لسنوات عديدة قادمة. والأسئلة الأكثر أهمية لمهندسى الجينومات المستقبليين هى، كيفية تخفيض تكاليف بناء مثل تلك الأحجام؟ ومتى ستكون دنا بمثل هذا الطول متاحة فى خلال أيام أو ساعات بدلاً من خلال شهور؟ ومتى يتمكن المرء من شراء أو بناء صندوق يوضع فوق سطح المكتب يطبع دنا مُخلَّقًا بهذا الطول؟ وأنا لا أملك إجابات محددة لتلك الأسئلة، غير أن ثمة ضغوطًا واضحة من الأسواق لتخفيض

التكاليف ولتطوير إمكانات توضع فوق سطح المكتب لطباعة الجينومات، وهو الأمر الذى سوف أتناوله فى الفصول التالية.

وبغض النظر عن سرعة تطور التكنولوجيا، فإن انخفاض التكاليف الرأسمالية والعمالية سوف يستمر. وسوف تدعم هذه التوجهات التوصل إلى تقنيات بيولوجية معقدة فى كل أركان العالم وتطويرها. وسوف ينشغل باقى هذا الكتاب باستكشاف نتائج ذلك الانتشار.

الفصل التاسع

بشائر التكنولوجيا البيولوجية وأخطارها

إن البيولوجيا هى مثال للتكنولوجيا ذات الاستخدام المزدوج. وفى الإمكان استخدام كل الأدوات والتقنيات، التى تبشر بالتقدم فى العلوم الأساسية وتتيح فرص صناعة لقاحات جديدة، استخداماً شائناً بنفس السهولة واليسر.

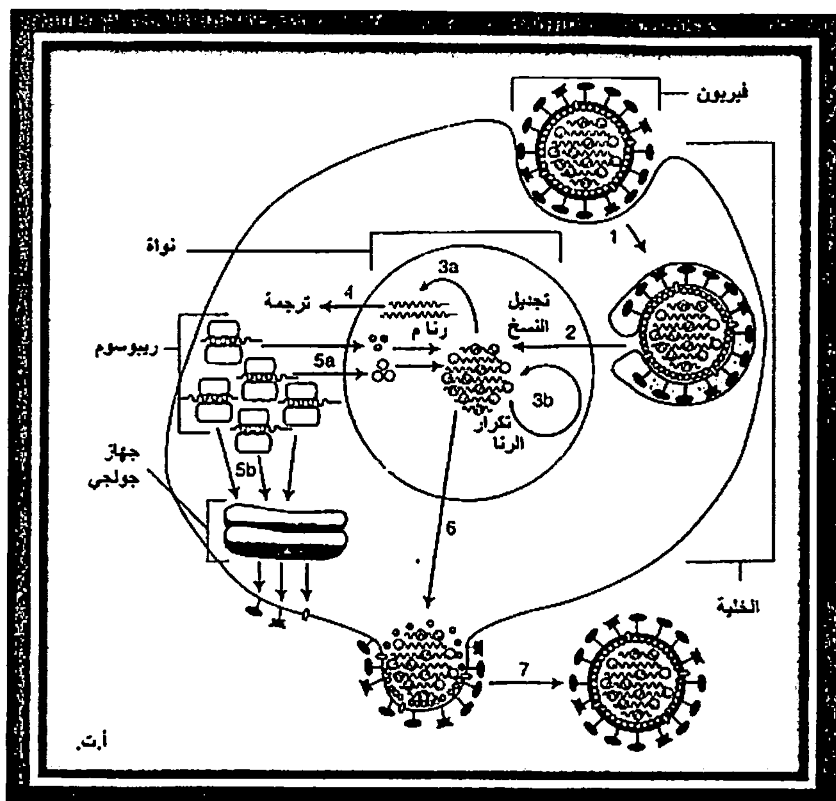
واستجاباتنا للجراثيم المعدية مثل الإنفلونزا وفيروس سارس هى امتحان رائع لعلومنا وسياساتنا الخاصة بمدى استعدادنا للتهديدات المستقبلية. ولا نستطيع أن نأمل فى أن نكون مستعدين للمفاجآت، سواء التى من صنع البشر أو الطبيعية منها، إلا بالدراسة العلنية للجراثيم المُمْرِضة التى تتسبب فى الأوبئة، والمناقشة العلنية للنتائج، والتحضير العلنى لدفاعاتنا.

كيف يتم تجميع فيروس الإنفلونزا

هناك خطورة وصعوبة فى التعامل مع فيروسات الإنفلونزا على طاولة المعمل. فقدرتها على التسبب فى الأمراض فى الكائنات الأخرى - أى قدرتها الإمراضية - ليست مفهومة تمام الفهم. ويحتاج إدراك خطورة الوسائل المستخدمة فى دراسة الفيروسات المُمرِضة وأخطارها إلى استعراض بالرسومات التوضيحية للتقنيات ذات الصلة (شكل ٩-١).

والإنفلونزا هى من فيروسات الرنا؛ وجيناتها ليست مشفرة على دنا مزدوج الجديلة، ولكن فى جينوم مكون من رنا وحيدة الجديلة. ومما يزيد الأمور تعقيداً أن

الجينوم هو رنا سالب الجديلة. ويجب أن يُنسخ الجينوم إلى رنا موجب الجديلة - رنا المرسال (mRNA) - قبل أن تنفك شفرته (يُترجَمُ - يتحول) إلى بروتين. وقد بدأت البيولوجيا الجزيئية، بوصفها علمًا، لتوها فقط تنتج أدوات تتيح للعلماء التلاعب بالفيروسات سالبة الجديلة ومن ثم دراستها؛ وهو أمر ما زال بالغ الصعوبة.



شكل (٩-١): تكاثر فيروس الإنفلونزا. (١) تبدأ العدوى بدخول جسيم فيروسي واحد أو أكثر إلى خلية. (٢) جينوم الرنا الفيروسي وبعض البروتينات الفيروسية الأصلية تدخل نواة الخلية. (٣أ) يُترجم الجينوم (يتحول) إلى رنا المرسال (رنا م)، ويتم نسخه (٣ب) في نفس الوقت. (٤) يُترجم رنا م الفيروسي بواسطة ريبوسومات الخلية العائلة إلى بروتينات، ويُستخدم بعضها (٥أ) لإنتاج نسخ إضافية من الجينوم، بينما يوضع البعض الآخر بواسطة الخلية ويُعرض على غشاء الخلية. (٦) تتكون جسيمات جديدة من الجينوم المنسوخ ومن غشاء الخلية العائلة الذي يحوي جسيمات فيروسية. (٧) يتم إطلاق جسيمات فيروسية معدية.

ولا تمتلك فيروسات الإنفلونزا إلا أحد عشر جينًا موزعة على ثمانية كروموسومات (أحيانًا يُطلق عليها «قطاعات الجينات» مع وجود أكثر من جين واحد في كل قطاع). وهذه الكروموسومات معبأة، مع عدة أنواع من بروتينات الفيروس، داخل غلاف مكون في غالبيته من غشاء مسروق من إحدى خلايا العائل تم فيها إنتاج «الفيريون» (virion) وهو جسيم فيروسي مُمرِض وحيد. ومن بين البروتينات التي يحملها الفيروس هناك بوليميريز الرنا (RNA polymerase) الذي ينسخ الجينوم ذا الجديلة السالبة ويحوله إلى رنا-المرسال الذي تترجمه خلايا العائل بعد ذلك إلى بروتينات. ومنذ زمن طويل تسببت تعقيدات كلٍّ من تعبئة الفيروس وإستراتيجية التشفير في جعل أي تعامل مع الإنفلونزا في البيولوجيا الجزيئية أمرًا بالغ الصعوبة.

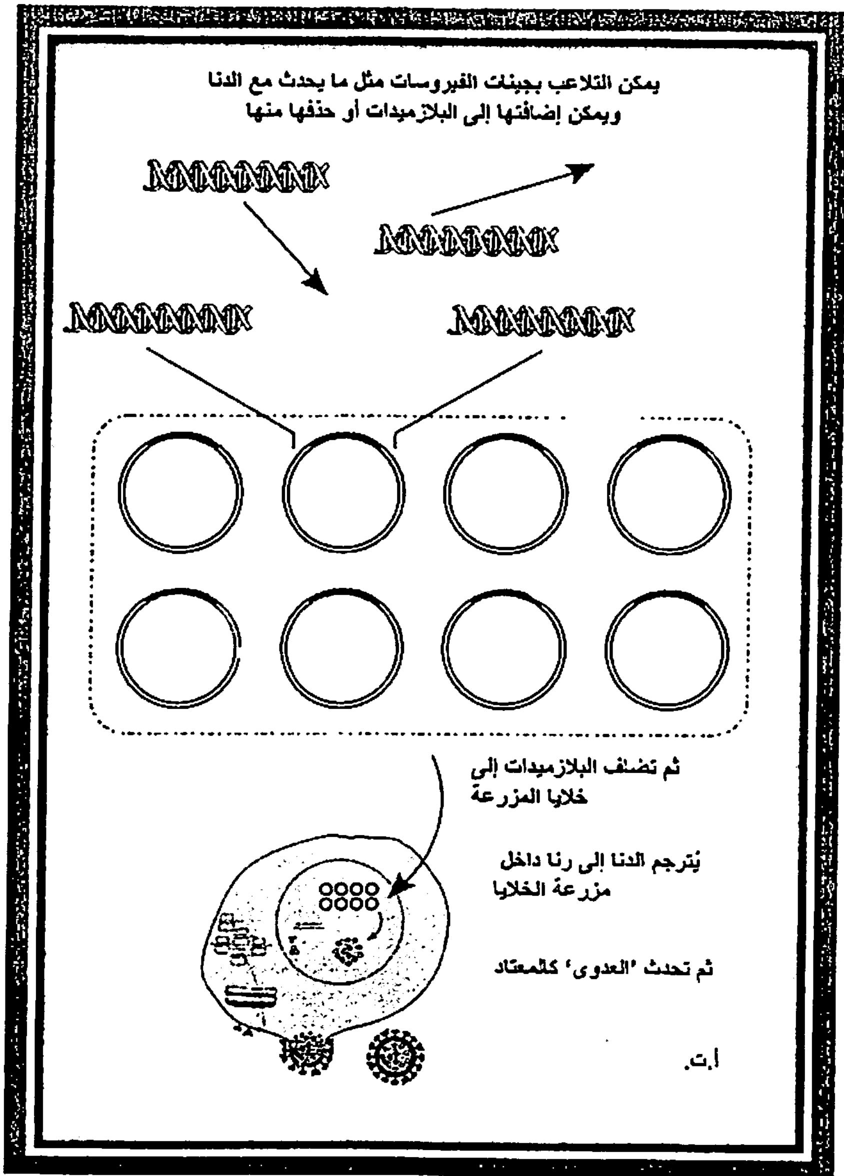
ومما يزيد الأمر صعوبةً السرعة التي يتغير بها الفيروس في حالته البرية. ولعل أكثر وسائل تطور الفيروس شيوعًا هي من خلال (١) تطفر (تغير) القواعد الفرادى و (٢) «إعادة التشكيل»، وهي تبادل كروموسومات بأكملها والتي تتحقق عندما يصيب أكثر من فيروس نفس الخلية وفي نفس الوقت. ويضاف إلى ذلك أن بوليميريز الرنا الفيروسي كثير الأخطاء في النسخ، وذلك يعني إنتاج سلَسلات مختلفة أثناء العدوى، مما يزيد من قدرات الفيروس على التحور في مواجهة ضغوط الأدوية واللقاحات.

نُشِرت المقالة الأولى سنة ١٩٩٠ وكانت تتناول ما أُطلق عليه "النظام الجيني المعكوس" (reverse-genetics system) [1]، لبناء فيروس الإنفلونزا. وابتكر المؤلفون طريقة لبناء رنا فيروسي من قطع أساسية، يمكن أن تكون تخليقية المنشأ. ونظرًا للصعوبات الكامنة في التعامل مع الرنا في المعمل، فقد كانت الإستراتيجية التكنولوجية التي طُوِّرَت للتعامل مع فيروسات الرنا تدور حول تبسيط المشكلة بالعمل على الدنا بدلاً من ذلك. وعادة ما يبدأ الباحثون ببناء البلازميدات – وهي شظايا التكنولوجيا البيولوجية المنتشرة في كل مكان والتي تناولناها في الفصل الثاني – التي

تحوى نسخًا من الدنا الخاص بجينات الفيروسات، وبعد ذلك يتم نسخها نسخًا منعكسًا إلى رنا فيروسى ((vRNA) فى المختبر (شكل ٩-٢).

كان هدف مؤلفى مقالة ١٩٩٠ التخلص من "صعوبات تعديل جينومات الفيروسات ذات الرنا السالبة الجديلة التى أبطأت من سرعة تقدمنا فى فهم النَسْخ المتماثل والقدرة الإمراضية لمجموعة الفيروسات ذات الجديلة السالبة". وأثناء تطلعهم للمستقبل لاحظوا أيضًا أن "القدرة على تخليق فيروسات تحدث فيها تطفرات فى أماكن محددة سوف تسمح بهندسة فيروسات الإنفلونزا ذات خصائص بيولوجية محددة".

نُشرت طوال تسعينيات القرن العشرين مقالات تتناول التحسينات التى طرأت على النظام الجينى المعكوس. وتحدث مقال سنة ١٩٩٩ عن «تعبئة البلازميدات» التى تُبَسِّطُ تجميع الفيروسات[٢]، وجاء فيها أن السَلْسَلات الخاصة بتعبئة البلازميدات شملت برنامجًا (١) وضع تصميمًا لسلوكيات البروتينات داخل خلية العائل للبدء بجعل البروتينات الفيروسية لازمة لنسخ الدنا إلى رنا فيروسى و (٢) ثم وَجَّهَ بناء بروتينات إضافية كى تعمل فى الواقع على محاكاة العدوى الفيروسية عن طريق تعبئة الرنا الفيروسى فى جسيمات فيروسية نشطة. وحدث تقدم أكثر سنة ٢٠٠٥ بتقليص عدد عبوات البلازميدات من ١٢ إلى ٢، وبذلك تحسنت بصورة مثيرة كفاءة بناء فيروسات اصطناعية[٣].



شكل (٩-٢) تجميع فيروس الإنفلونزا المخلق بواسطة النظام الجينى المعكوس.

توابع إعادة تجسيد وباء عالمى

فى خريف ٢٠٠٥ ظهرت عدة أبحاث رفيعة المستوى ومفرطة فى أكاديميتها تصف التوابع الجينومية لوباء الإنفلونزا الإسبانية الذى حدث سنة ١٩١٨، والذى قتل ما يزيد على ٤٠ مليون شخص على مستوى العالم فيما بين ١٩١٧ و١٩١٩. ولقد تحقق هذا الإنجاز لأن جفرى توبنبرجر، من معهد القوات المسلحة الأمريكية لعلم الأمراض فى مدينة روكفيل بولاية ماريلاند، نجح فى تحديد سلسَلة الفيروس مستخدمًا شظايا الرنا التى استطاع استخلاصها من عينات أنسجة مخزونة فى مستودعات حكومية ومن رئات ضحية للوباء مدفونة فى الجليد الدائم فى ألاسكا. ثم أعيد بناء السلسَلة الطبيعية بواسطة فريق قاده ترنس تمبى من مركز أبحاث الأمراض ومنعها (CDC). وروجعت المقالات الجينومية بواسطة المجلس الاستشارى القومى العلمى للأمن البيولوجى، وهو مكون من أعضاء مشهود لهم بالعلم وينتمون لمؤسسات أكاديمية وحكومية، وقرروا أن نشر المقالات فى الصالح العام للجمهور(*).

استنكر النقاد إعادة تكوين السلسَلة بوصفها قمة الحماقة، مؤكدين أن المشروع كانت فوائده من النواحى العلمية والصحة العامة مشكوكًا فيها، وأنه كانت تكفى الدراسة الإلكترونية لا المعملية لاكتشاف أسرار الفيروس[٤]. ورغم ذلك، وفى خلال عام من إعادة تكوين فيروس الإنفلونزا، ظهرت مقالات تؤيد قرار إعادة بناء الفيروس. وقرر ج. س. كاش وآخرون أنه "على وجه الخصوص، أشارت النتائج التجاربية إلى حدوث تفاعل تعاونى بين جينات فيروس إنفلونزا ٩١٨، وأن دراسة إمراضية إنفلونزا ١٩١٨ تستلزم استخدام الفيروس المعاد تكوينه بصورة كاملة"[٥]. وفى أوائل ٢٠٠٧، امتدت هذه الدراسة حتى شملت الرئيسات فى دراسة بحثت فى القرود الآليات الجزيئية التى يقوم بها العائل ضد الفيروس[٦]. وذكرت تلك المقالة الدور المهم لاستجابة المناعة

(*) انظر القصة الكاملة لذلك الاكتشاف فى كتاب «الأمراض المعدية وعلاجاتها» ترجمة الدكتور أيمن توفيق وإصدار «دار سطور الجديدة» للنشر. (المترجم).

الداخلية الفطرية العنيفة فى كلٍّ من السيطرة على الفيروس والتسبب فى دمار أنسجة العائل، والتى قد تفسر لماذا قتلت الإنفلونزا الإسبانية البالغين الشبان الأصحاء بذلك المعدل المرتفع(٧). وما زالت الأبحاث مستمرة للكشف عن السبب فى أن سلالة ١٩١٨ من الإنفلونزا كانت قاتلة بتلك الشدة.

وعندما أُعلن عن سَلسَلة سلالة ١٩١٨ لفيروس الإنفلونزا، تشكك عدد من الدوريات التى تتسم بوضوح الرؤية وتهتم بعرض وجهات النظر الشخصية، تشككت فى حكمة كشف تلك المعلومات للجمهور، واقترحت أن تُستغل تلك السَلسَلة فى خلق سلاح بيولوجى. وقد يبدو، من منظور أسلوب «الليجو» فى البيولوجيا، أن كل ما عليك فعله هو أن تضع السَلسَلة المناسبة للدنا فى بلازميدات التعبئة، وتقلبها فى وعاء يحوى خلايا من ثدييات، ثم تنتظر حتى تنتشر الفيروسات المعدية فى كل أرجاء مزرعة الاستنبات. غير أن الحقيقة تقول إن الأمر يموج بالفن الرفيع والمهارة، وأن الأمر ليس ببساطة أن تأخذ دنا مُخَلَّقًا ومنه تخلق فيروسات مُمْرِضة ذات جديلة سالبة مثل الإنفلونزا. وهذا أمر مصيرى. وقد ناقشت هذا الموضوع مع عدد من خبراء فيروسات الرنا، وبعضهم عمل فى سَلسَلة سلالات الإنفلونزا، وأجمعوا جميعًا على أن إعادة نسخ جينوم الإنفلونزا هو أمر بالغ الصعوبة فى الوقت الراهن حتى على الخبراء(٨). ولسوء الحظ، لم يشارك العلماء المختصون إلا فى عدد نادر من المناقشات حول المخاطر التى تطرحها المُمْرِضات المعاد تكوينها.

غير أن الأهم من ذلك أن أخطار الإطلاق الحديث لفيروس إنفلونزا ١٩١٨ ليس أمرًا رهيبًا كما يتخوف الكثيرون. ففى موسم (٢٠٠٧-٢٠٠٨) وجد مركز أبحاث الأمراض ومنعها أن ٢٦ بالمائة من العينات الإيجابية لفيروس الإنفلونزا احتوت على النوع الفرعى «إتش١ إن١» (H1N1)، والذى أُطلق عليه هذا الاسم بسبب بروتينات موجودة على سطحه الخارجى، وهى مطابقة للبروتينات الموجودة على سلالة ١٩١٨(٩). وإذن، فهذا النوع الفرعى مستمر فى الانتشار فى السكان على نطاق واسع، وقد

تكونت عند غالبية الناس بعض المناعة ضده[١٠]. ودون أن نهون من شأن أى مرض قد ينجم عن إطلاق فيروس إنفلونزا ١٩١٨ الأصلى، نستطيع أن نستنتج أن احتمالات حدوث ذلك سوف تكون بالضرورة قاتلة بمثل ضراوة الموجة الأولى هى أقوال تغلب عليها المبالغة.

ومع ذلك، وعلى غرار كل تكنولوجيا بيولوجية جاء ذكرها فى هذا الكتاب، فالأمر الذى لا مفر منه هو أن تكنولوجيا بناء فيروسات الرنا سوف تنتشر. وعلى الرغم من أن إعادة خلق فيروسات إنفلونزا مُمرِضة وحية من دنا تخليقى يشكل منذ الآن تحديًا حتى للخبراء، فإنى على يقين من أنه بمرور الوقت سوف تصل المهارات اللازمة لذلك إلى أشخاص لديهم قدر أقل بكثير من الإحساس بالتعامل الآمن مع الجراثيم الناتجة. ولعله سيكون ثمة صندوق معدات متاح يومًا من الأيام يقلص من المهارات اللازمة لتنفيذ وصفة، وربما ستكون هناك منصة مؤتمتة تنفذ الوصفة بأقل مشاركة بشرية.

وسوف تكون الأخطار هائلة على الصحة العامة والأمان من جراء شيوع المهارات وانتشار التقنيات. وفى نهاية المطاف سوف نحتاج إلى توخى اليقظة المستمرة والمقدرة على اكتشاف التهديدات، وإجهاضها أو معالجتها، بعد إشعار قصير الأجل. وكما سأناقش فى الجزء التالى من هذا الفصل، نجد أن ضمانات الصحة العامة والأمان تقتضى نضجًا كبيرًا وسريعًا للتقنيات التى تتيح الهندسة البيولوجية وبالتالى تتيح أيضًا زيادة الأخطار.

نحن فى مأزق؛ وليس أمامنا سوى خيار واحد. فنحن فى حاجة إلى تكنولوجيا تتعامل مع التهديدات، وليس من الممكن تطويرها إلا فى نطاق اقتصاد بيولوجى متنوع وقادر. ولكن وجود تلك التكنولوجيا سوف يسمح باستخدام منتشر لكل من الأهداف المفيدة والضارة. ويحتاج التعامل مع الأخطار البيولوجية البازغة إلى وسائل اتصال أفضل وإلى قدرات تكنولوجية نحن نمتلكها الآن، كما ثبت من التقدم الذى نتج عن

إعادة بناء جينوم فيروس إنفلونزا ١٩١٨ ونشر نتائجه. والمناقشات المفتوحة والبحوث هى أدوات أساسية لخلق عالم أمن.

ولكى أكون واضحًا فأنا لا أستبعد أن تُستخدم تقنيات تخليق الدنا فى أغراض دنيئة، غير أنى أتوقع أن يكون تهديدًا يلوح فى الأفق وليس خطرًا وشيكًا داهمًا. وقد انتهت دراسة حديثة تناولت صعوبات بناء جراثيم مُمْرِضة من الصفر، انتهت إلى أن "أى تخليق للفيروسات، حتى ولو كانت بالغة الصغر أو بسيطة نسبيًا، هى عمل شاق نسبيًا"(١١). ثم يعترف التقرير أن الأخطار قابلة للتفاقم؛ ومما لا ريب فيه أن جرثومة مخلقة سوف تشكل تهديدًا يومًا من الأيام.

ولا يجب علينا أن ننتظر حتى ذلك اليوم لنرى كيف سنستجيب لتلك التهديدات؛ فنحن الآن تحت رحمة العديد من الأمراض البازغة. وفى حين تبدو تهديدات المُمرِضات الاصطناعية فى أدنى درجاتها حاليًا، إلا أن الخطر الحالى الواضح هو بسبب المُمرِضات الموجودة طبيعيًا والتى نجد أننا عاجزون عن الدفاع عن أنفسنا ضدها. والجمع بين تزايد تطفل البشر على بيئات كانت فى السابق هادئة والانتقال السريع للبشر والسلع حول العالم يرفع رايات الخطر للمراقبين المهتمين بالصحة العامة والأمن القومى. وينهى جفرى تاوبنبرجر حديثه عن إعادة تكوين فيروس إنفلونزا ١٩١٨ قائلاً: "ليست هناك ضمانات قاطعة للأمان. ونحن مدركون أن كل خطوة تكنولوجية إلى الأمام يمكن إساءة استغلالها. غير أن ما نحاول أن نفهمه هو ما يحدث فى الطبيعة، وكيف نتجنب جائحة عالمية أخرى. وفى هذه الحالة تكون الطبيعة هى الإرهابى البيولوجى"(١٢).

إن المعضلة هى المُمرِضات الموجودة طبيعيًا، وهى معضلة عاجلة وملحة، وسوف تحدد مسار استثماراتنا العلمية والتكنولوجية فى المستقبل القريب.

الأمراض المعدية البازغة هى اختبار لمدى استعدادنا للمُمرِضات الاصطناعية

على مدار القرنين السابقين أحدثت اللقاحات تغييرات مبهرة فى مدى قابلية البشر والحيوان للأمراض. وفى حين تتوفر المضادات الحيوية لعلاج معظم أنواع العدوى الجرثومية والعدوى بالفطريات، إلا أن الاختيارات العلاجية المتاحة محدودة للغاية للأمراض الفيروسية؛ فاللقاحات لا تزال هى الإجراءات الأساسية فى مواجهة التهديدات الفيروسية.

تتكون غالبية اللقاحات من مُمْرِضٍ مستضعف أو مقتول، أو من جراثيم وثيقة الصلة بالجرثومة المُمرِضة بحيث تضفى مناعة تبادلية السلالة. وبصورة عامة يتم إنتاج الفيروسات المقرر استخدامها فى اللقاحات فى مزرعة للخلايا أو تتم تنميتها فى بيض دجاج مخصب فى معامل معقمة. وفى حين أثبتت هذه الإستراتيجية فائدتها ضد العديد من المُمرِضات، إلا أن استخداماتها فى المستقبل محفوفة بالشكوك. ونتج عن الانخفاض التدريجى فى القدرات الإنتاجية نقصٌ حديثٌ فى اللقاحات أثناء فترات الطلب المُلِحّ الحاد (١٣). وفقد الإنتاج التجارى للقاح الإنفلونزا شعبيته لدى الشركات المُصنِّعة، لأن تكاليف المحافظة على الإمكانات المناسبة مصحوبة بانعدام التأكد حول الطلب سنة بسنة، يُصَعِّبان من مهمة التحصل على ربحية ملائمة، أو على الأقل التنبؤ بها. ويضاف إلى ذلك أنه، حتى مع الإعلان الحديث عن مشاركة حكومية كبيرة فى الأسواق، فإنه لا يبدو واضحًا ألبتة أن التقنيات الحالية تسمح بإنتاج عدد كافٍ من الجرعات لحماية أعداد كبيرة من السكان ضد جائحة عالمية (١٤).

ويشكل «نقص اللقاح» الناتج عن ذلك ما هو أكثر من مجرد حلقة ضعيفة فى البنية التحتية الخاصة بالصحة العامة فى الدول النامية. فهو مثال جلى للتهديدات التى تشكلها الأمراض المعدية الناشئة ضد مصالح كل الأمم. ويزيد الترابط الاقتصادى النامى بين دول الأمريكتين وأوربا وآسيا وأفريقيا من حدة الأخطار البيولوجية على مستوى العالم.

وبنظرة مستقبلية، نجد أن تقديرات التبعات الاقتصادية لجائحة إنفلونزا تربو على تريليون دولار(١٥). ويعود جانب كبير من هذا الرقم إلى القيود التي تُفرض على السفر والتجارة المفقودة، وهي توابع حتمية لا مهرب منها لمثل تلك الجائحة. كما أن تحجيم التجارة العالمية له تأثيرات إضافية على المراحل المتأخرة في تصنيع اللقاحات بسبب الاعتماد الحالي للمشاريع العلمية على سرعة النقل البحري للكيماويات ومستلزمات المعامل. وقد يتأثر البحث العلمي وتطوير الإجراءات الوقائية باضطراب النقل البحري الذي قد يؤدي إلى صعوبة الحصول على المواد الأساسية مثل القفازات ومستهلكات المعامل والكواشف الكيماوية. ونتيجة لذلك، فإن الأمن الجسدي والاقتصادي قد يفيد لا من انتشار اللقاحات فحسب وإنما أيضًا من انتشار إنتاجها في أوسع مدى ممكن. ولسوف نستفيد استفادة جمة من استثمارات واسعة النطاق في الاستعداد للجائحة.

ورغم وجود احتمالات كبيرة بعيدة المدى للتهديدات الاصطناعية، فإنها أخطار افتراضية وغير محتملة في المستقبل القريب(١٦). أما الفيروسات الطبيعية فهي المثال الحقيقي للتهديدات الحديثة النشأة. وتشكل استجاباتنا لفيروس سارس ونشأة سلالات جديدة لإنفلونزا الطيور إطارًا نتفحص من خلاله قدراتنا التكنولوجية الحالية.

الاستجابة لسارس

في سنة ٢٠٠٢ ظهر فيروس جديد في تجمعات سكانية بشرية وتسبب في موت سريع مؤسف لقرابة ١٠ بالمائة من الذين أصيبوا به. وكلمة سارس مستمدة من الحروف الأولى للكلمات التي تعني المتلازمة الرئوية الحادة العنيفة (Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS) ويسببه فيروس من نوع «كورونا» (كو في) (coronavirus, CoV) والذي كانت الإصابة به تقتصر في السابق على الحيوانات في جنوب الصين. والمرض سريع العدوى وينتشر بسرعة عبر عدة قارات

بواسطة السفر جواً، وتأخر التعرف عليه بسبب كتمان المعلومات داخل الصين. وحدثت آخر إصابة بشرية نشأت من الوباء الأصلي بفيروس سارس-كو في في يونيو ٢٠٠٣ – كما تسببت حوادث في المعامل في إصابات فردية تالية – وبلغ العدد الرسمي للحالات ٨٠٩٦ حالة، وبلغ إجمالي الوفيات٧٧٤ [١٧].

وكثيراً ما تتشدق التقارير الصحفية بالسَلسَلة السريعة للمُمرِض بوصفها ذروة منجزات التكنولوجيا الحديثة واستخدامها في صد التهديدات. ويُفسر هذا الإنجاز بأنه انتصار على الفيروس، وكأنما السَلسَلة أسهمت في هزيمة الوباء. غير أنه في حين أن السَلسَلة ربما ستكون حاسمة في محاربة الأمراض المعدية المستقبلية البازغة، إلا أن التكنولوجيا لم تلعب إلا دوراً صغيراً في تحجيم ضحايا سارس.

ولما كانت الإصابة البشرية الأصلية بفيروس سارس أمكن تتبعها من وجهة نظر الطب الشرعي إلى نوفمبر ٢٠٠٢، إلا أن هذه النتيجة لم يُتَوَصَّل إليها إلا بعد انحسار الوباء وبهذا فهي مجرد استعراض تذكري للأحداث [١٨]. وجاءت أول إشارة في الوقت الحقيقي للخطر الفيروسي الناشئ في تقرير قدمه الدكتور كارلو أورباني إلى منظمة الصحة العالمية في أواخر فبراير ٢٠٠٣، وصدرت تقارير تحذيرية خاصة بالسفر والترحال طوال الأسابيع الأربعة التالية، وتوثقت منظمة الصحة العالمية من وجود «ناقلين سوبر» للمرض، وهم حملة للمرض يكادون لا يشكون من أية أعراض وينشرون المرض في كل الأرجاء. وتم الإعلان عن سَلسَلة سارس في منتصف أبريل ٢٠٠٣، ولكن ذلك حدث قبل التعرف الذي لا غموض فيه ولا التباس على «سارس-كو في» بوصفه العامل المسبب للمرض الإكلينيكي [١٩].

وبعد ستة أسابيع حدثت آخر وفاة من الوباء الطبيعي. ولكن الأمر احتاج إلى الانتظار إلى أكتوبر عندما أعلن فريق رالف باريك بجامعة نورث كارولينا عن نظام مبني على النظام الجيني المعكوس للتعامل مع ذلك الفيروس في المعمل (استُخدِم هذا البروتوكول في المعمل منذ ٧ يونيو)[٢٠]. وذلك يعني أن جانبًا ضئيلاً فقط من البيولوجيا الجزيئية قد استُخدِم على الفيروس – أي بدون علوم أساسية وبالتأكيد لم

يتم تطوير أى لقاح – إلا بعد انحسار الوباء بزمن طويل. وحتى تلك القدرات المتأخرة لم تتم إلا لأن باريك قد استثمر الوقت والجهد لسنوات قبل ذلك لتجهيز التقنيات العملية المناسبة. وقد نُشر ذلك لأول مرة سنة ٢٠٠٠، وهو مثال على بحثٍ علمى دافِعه الفضول ثم يلعب دورًا محوريًا فى أزمة لاحقة فى الصحة العامة[٢١].

وبعد الإعلان عن النظام الجينى المعكوس الخاص بـ «سارس-كو فى»، مرت ستة أشهر أخرى قبل تحضير أول لقاح ثديى فعال: وكان ذلك بعد مرور عام كامل على ذروة الوباء[٢٢]. وفى حين يمكننا أن نعزو التأخر فى الإعلان عن كلٍّ من النظام الجينى المعكوس واللقاح إلى مواعيد النشر الأكاديمى، وفى حين ربما يكون التقرير الأصلى عن الوباء قد تأخر لسوء صناعة القرار البشرى، إلا أنه من الواضح أن رد الفعل التكنولوجى قد تأخر تأخرًا شديدًا وراء سرعة الفيروس.

ويضاف إلى ذلك أن النمذجة الوبائية التى تمت بعد الوباء تشير إلى أن سارس لم يتم احتواؤه بنجاح بواسطة إجراءات الصحة العامة إلا بسبب "قابلية الْمرِض المتوسطة للانتقال مصحوبة بانخفاض قدراته على التسبب فى العدوى قبل ظهور الأعراض الإكلينيكية"[٢٣]. وبمعنى آخر، يبدو مع الاستعراض التذكرى للأحداث أن الفيروس ربما لم تكن لديه القدرة الحقيقية على التسبب فى جائحة عالمية مدمرة. ولو كان الفيروس يتسم بقدرات انتقالٍ أعلى قليلاً أو كان يملك قدرة أشد قليلاً على التسبب فى العدوى قبل ظهور الأعراض، لما كانت إجراءات الصحة العامة كافية لوقف انتشار المرض[٢٤]. ولا تفيد هذه التخمينات إلا فى إلقاء مزيد من الأضواء على العجز التكنولوجى الذى كشفه الجدول الزمنى لوباء سارس (الجدول ١-١)[٢٥]. ولحسن الحظ، كانت إجراءات الصحة العامة كافية لهذا الفيروس بالذات، مما يعلمنا درسًا أن تقوية جهاز الصحة العامة أمر أساسى للاستعداد للأوبئة المستقبلية. غير أننا، وبدون التقليل من شأن الأرواح التى أنقذتها إجراءات الصحة العامة، علينا أن نقر بأن التدخل البشرى لم يؤثر إلا بصورة واهية فى مسار فيروسٍ تبين أنه أقل قتلاً مما كان التخوف المبدئى. وفى المرة القادمة قد لا نكون على نفس الدرجة من حسن الحظ.

الإنفلونزا: هل سيكون هو الفيروس التالى المسبب للقلق؟

إن فيروسًا ينتشر فى تجمع سكانى ربما يكون قد تغير تغيرات جوهرية فى الوقت الذى يصبح فيه لقاحٌ ضده جاهزًا. فالمعدل المرتفع لتطفر فيروسات الإنفلونزا وسبقه الزمنى الطويل على إنتاج لقاح بالتقنيات الحالية يجعل من الصعوبة بمكان صناعة لقاح يتماشى مع سلالة معينة جديدة.

ولعل الجغرافيا تلعب أيضًا دورًا فى هزيمة اللقاحات. فالأجسام المضادة التى ينتجها حيوان النمس ضد لقاح إنفلونزا «إتش٥ إن١» البشرى (H5N1 الذى تم عزله فى فيتنام) تتفاعل بقوة مع عَزلات الإنفلونزا المعزولة من فيتنام ولكنها لا تتفاعل إلا بِوَهَنٍ وضعف ضد العزلات المأخوذة من إندونيسيا ومن الجانب الأكبر من الصين[٢٦]. وبالعكس، نجد أن الأجسام المضادة التى يكونها حيوان النمس ضد العزلات الإندونيسية لا تتفاعل إلا بضعف ضد العزلات من فيتنام والصين. ونظرًا لتنوع السلَسَلات فى الحياة البرية، فإن الأجسام المضادة التى تتكون استجابة للسلالة الفيتنامية محدودة فى قدراتها على تحييد السلالات الإندونيسية والصينية وإبطال مفعولها، والعكس صحيح. وبتعبير آخر، نجد أن اللقاح المُصنَّع باستخدام سلالة ما قد يكون محدود الفاعلية فى استثارة الجهاز المناعى ضد سلالة أخرى.

ومما هو أكثر إثارة للقلق الاكتشاف الحديث لنمط وراثى فى الحياة البرية مكون من قطع من فيروسات سبق التعرف عليها[٢٧]. فليس الأمر مجرد أن عزلات «تش٥إن١» الطيورى تتنوع فى البرية إلى حد أنها قد لا تستثير الجهاز المناعى للثدييات فحسب، وإنما أيضًا تتبادل القطع الفيروسية بنشاط. ومن الجلى أن الفيروسات قادرة على تبادل الابتكارات فى وقت قصير، وبذلك تتسبب فى تهديدات جديدة محتملة[٢٨]. واستجابة لهذه التطورات نصحت منظمة الصحة العالمية العلماء فى ٢٠٠٦، بأن يشرعوا فى العمل على لقاحات لفيروس «إتش٥إن١» تنبنى على عزلات من إندونيسيا[٢٩]. ونلاحظ أن ذلك لا يعنى الإنتاج الفورى للقاحات فاعلة وفقًا لتلك العزلات.

ويزداد الموقف تعقداً عندما نتبين أن سلالات الإنفلونزا تستطيع أن تتملص من اللقاح فى غضون موسم واحد للإنفلونزا، كما أثبتته مقارنة العينات السنوية للإنفلونزا بسَلسَلة الجينومات. وبعد أن تحدد اللقاح السنوى لموسم ٢٠٠٣-٢٠٠٤، وبدأ إنتاجه، التقطت سلالة الفيروس الأكثر انتشاراً بالفعل فى ذلك العام جيناً من مجموعة صغيرة من البشر، وبهذا أنتجت سلالة جديدة "كانت فاعلية اللقاح الموجود تجاهها محدودة"[٣٠].

لا تزال التوابع الإكلينيكية لهذا الحدث غير مفهومة تماماً، مع تقديرات لفعالية اللقاح - أى نجاحه فى منع الأعراض الرئوية - تتراوح بين ٣ بالمائة و٩٥ بالمائة[٣١]، وكانت موجة العدوى لسنة ٢٠٠٣-٢٠٠٤ مصحوبة بأرقام غير اعتيادية فى ارتفاعها لأعداد وفيات الأطفال، كما كانت هناك قفزة غريبة فى إجمالى حالات الالتهاب الرئوى والوفيات المرتبطة بالجهاز التنفسى فى الفترة الأولى من ٢٠٠٤[٣٢].

وفى ٢٠٠٨ «فشل» اللقاح السنوى مرة أخرى، وأثبتت دراسة فى الولايات المتحدة أن فاعليته لم تتجاوز ٤٤ بالمئة مقابل فاعلية كانت متوقعة تبلغ ٧٠-٩٠ بالمائة[٣٣]. وذكر مركز السيطرة على الأمراض ومنعها أن الوفيات من جراء الالتهاب الرئوى والإنفلونزا فاقت مستوى الوباء لمدة تسعة عشر أسبوعاً متوالية فى أوائل ٢٠٠٨، وتشكل هذه المعطيات دليلاً تاريخياً واضحاً على أن فيروسات الإنفلونزا تستطيع الإفلات من التأثيرات الوقائية للقاح عن طريق إعادة التشكل فى وقت أقل كثيراً من الوقت الذى يتطلبه تحضير لقاح.

وتؤكد هذه النتائج الاستنتاجات التالية: لما كان المجال الزمنى الذى يحدد استجابتنا التكنولوجية أطول بكثير من الزمن الذى ينشأ فيه التهديد ويتغير، فإن ذلك يقتضى منا أن نستثمر بشدة فى تكنولوجيات جديدة تختلف سماتها اختلافاً جذرياً عن تلك المستخدمة فى الإنتاج الحالى للقاح الإنفلونزا.

السجل الزمنى لوباء سارس

٢٠٠٢	١٦ نوفمبر	اكتشاف التهاب رئوى شاذ السمات فى جوانجدونج بالصين.
٢٠٠٣	١٦ نوفمبر	ظهور أول حالة من الالتهاب الرئوى الشاذ فى هانوى بفيتنام.
	٢٨ فبراير	كارلو أوربانى مسئول منظمة الصحة العالمية يفحص المريض.
	١٠ مارس	أوربانى يكتب تقارير للمكتب الرئيسى لمنظمة الصحة العالمية عن وباء كبير.
	١١ مارس	ظهور وباء لمرض تنفسى غامض فى هونج كونج.
	١٢ مارس	منظمة الصحة العالمية تصدر تحذيرًا عالميًا.
	٢٩ مارس	وفاة كارلو أوربانى.
	٤ أبريل	إضافة سارس إلى قائمة الأمراض التى توجب الحجر الصحى فى الولايات المتحدة.
	٩ أبريل	فريق منظمة الصة العالمية يكتشف دلائل على وجود "عوامل انتشار سوبر".
	١٢ أبريل	باحثون كنديون يعلنون عن إنجاز أول سلسلة.
	١٤ أبريل	مركز السيطرة على الأمراض ومنعها يعلن عن سلسة مماثلة.
	١٦ أبريل	منظمة الصحة العالمية تتعرف على العامل المرض رسميًا.
	٣٠ مايو	نشر "سلسلة ساريوس – كو فى" فى مجلة نيتشر.
	١ يونيو	أخر وفاة من الوباء "الطبيعى".
	٣ أكتوبر	فريق باريك ينشر النظام الجينى المعكوس مستخدمًا سلالة أوربانى.
٢٠٠٤	١ أبريل	يانج وفريقه ينشر لقاحًا من الدنا فى نموذج من الفئران فى مجلة "نيتشر"

جدول (٩-١) السجل الزمنى لوباء سارس

التعامل مع التهديدات الجديدة

ثمة حاجة إلى تقنيات جديدة للقاحات لوقاية الشعوب التى تتهددها أخطار الإرهاب البيولوجى والأمراض البازغة (سارس) أو الأمراض المعدية التى عاودت الظهور (الدرن والطاعون) وجائحات سلالات الإنفلونزا، وكلها تقع فى إطار السفر العالمى السريع. وتتضح بجلاء قدرات الأمراض المعدية على إحداث أضرار جسيمة من حقيقة أن عدد من أُدخِلوا المستشفيات من العسكريين الأمريكيين بسبب الأمراض فاق بمراحل أعداد من أُدخِلوا لأسباب أخرى، وذلك على مدار خمسة عقود من الحرب العالمية الثانية وحتى حرب الخليج الفارسى الثانية[٣٤].

ويتعين على أية تقنية جديدة لصناعة اللقاحات أن تواجه تحديات معينة فى التصميم كى تتمكن من معالجة المشاكل التى ذكرناها آنفًا. ومن الناحية المثالية يجب إنتاج اللقاحات بسرعة (خلال أسابيع من اكتشاف التهديد)، وألا تكون مرتفعة الثمن (حتى تكون فى الحدود العملية لميزانيات الصحة العامة حول العالم والتى لا تزيد على بضعة دولارات للفرد الواحد سنويًا). وترتفع احتمالات انتشار المرض قبل أن تتمكن أجهزة المراقبة من اكتشاف الخطر بسبب التدفق العالمى للبشر والحيوانات الحية والمنتجات الحيوانية والمواد البيولوجية عامة. ولم يكن إلا من قبيل حسن الحظ فى أحدث وبائين، سارس وفيروس غرب النيل، أن تصادف أن طبيبًا واحدًا كشف على مرضى متعددين، وبهذا تمكن من الاكتشاف المبكر مما أدى إلى الإقلال من انتشار تلك الأمراض[٣٥]. ورغم أن الحجر الصحى استُخدِم فى كلتا الحالتين، فإن العزل بصفة عامة لا يعتبر وسيلة ناجعة لاحتواء الأمراض المعدية، لأن هفوة صغيرة فى احتواء الوباء قد ينجم عنها انتشارات جديدة واسعة النطاق[٣٦]. ويشكل ذلك، على وجه الخصوص، مشكلة مع المُمْرِضات التى تنتشر قبل ظهور الأعراض المرضية على المرضى.

ومما هو وثيق الصلة بالموضوع فى الآونة الراهنة أن فيروسات الإنفلونزا تاريخيًا قد انتشرت انتشارًا واسع النطاق قبل أن تُكتَشف، ويشكل ذلك واحدًا من الأسباب

التى تجعل عدداً ضخمًا من جرعات اللقاحات والأدوية المقاومة للفيروسات أمرًا ضروريًا فى مقاومة أى وباء. وقد انتهت تحليلات الأوبئة البشرية الحديثة لفيروس «إتش٥إن١» التى أصابت تركيا وإندونيسيا إلى أن المرضى قد أصابتهم العدوى قبل خمسة أيام فى المتوسط من ظهور الأعراض، ويجعلها ذلك خارج نطاق الفترة الزمنية المتعارف عليها للاستخدام المجدى للأدوية المضادة للفيروسات(٣٧).

إن مشكلتنا العامة، التى أوضحها كلٌ من سارس وإنفلونزا الطيور، هى أن قاعدتنا التكنولوجية الحالية غير كافية للتعامل مع تهديدات جديدة. ولم ينجح البشر فى الماضى فى السيطرة على مُمْرِضٍ *سريع الانتشار* وجديد سواء بالأدوية أو باللقاحات. ولهذا فإن عملاً مثل ذلك فى المستقبل سيكون، من الناحية الفعلية، مثالاً لمحاولة تصميم نظام معقد مستخدمين فى ذلك أدوات أقل، ومعلومات حديثة أقل، من تلك المتاحة للدوائر الجينية التخليقية. وفى هذه النقطة علينا أن نعتمد على نماذج رياضياتية للتوصل إلى شىء من البصيرة حول العواقب المحتملة للإستراتيجيات المختلفة الخاصة بالصحة العامة واللقاحات.

وتشير هذه النماذج إلى أن أفضل إستراتيجياتنا فى الوقت الحالى هو، أن ندفع بالتكنولوجيا قُدُمًا بأسرع ما نستطيع كى نتوصل إلى حلول يمكن أن نستخدمها فى مجابهة سريعة وواسعة النطاق لأوبئة الأمراض. واللقاحات المصنعة هى من بين تلك الحلول المحتملة.

تواصل اللقاحات: من الطبيعية إلى التخليقية

ليست ثمة من حدود، واضحة أو متفردة تفصل بين (١) اللقاحات الطبيعية، التى تتكون من كائنات عضوية مستخلصة من مرضى وتم إنماؤها فى مزارع بيض أو خلايا حتى تصل إلى الكميات المطلوبة، و (٢) اللقاحات التخليقية، التى يتم تعديل جينوماتها أو تحوى قليلاً من المادة الجينية من المُمرِض الأصلى أو لا تحويها

ألبـتـة. وتُنتَجُ العـديد من اللقـاحـات بتـربية الجـراثيم بحـيث تكون أقل إمـراضـيـة. والتـقنيات المطورة حديثًا تضيف المزيد من الغشاوة حول الفروقات بين اللقاحات الطبيعية والتخليقية.

ويسمح ظهور السَلسَلة السريعة للجينوم المتكامل باكتشاف سَلسَلة الجينومات فى الكائنات وعزلها. وسوف تسمح التقنيات الجديدة لصنع اللقاحات بقصر الاستخدام على الجينات التى تتسبب فى استجابة مناعية وترك الجينات التى يستخدمها الكائن فى التكاثر أو فى إحداث المرض. وفى المعمل، يمكن استخدام جينات مختارة للإنتاج المباشر للبروتينات التى تُستخدَم باعتبارها مُستَضِدات (antigens)، وتضمينها فى الجراثيم الأقل إمراضيةً التى تعمل ناقلات للقاحات، أو إدماجها فى بلازميدات الدنا للحقن داخل الجلد (انظر الجدول ٩-٢). كل تلك التقنيات قد ثبتت فوائدها فى أحوال مختارة، مثل حماية النسانيس والخيل والأسماك والدجاج والنموس والقطط من فيروس إيبولا، وفيروس ماربورج، والعديد من فيروسات الإنفلونزا والتهاب المخ. ولكن بدءًا من أوائل ٢٠٠٨، توقف السماح باستخدام أىٍّ من تلك التقنيات فى البشر.

وليس فى الإمكـان صناعة لقـاحـات تخليقـية إلا من خـلال تطبيق التكنولوجيا الحديثة. فالتعامل مع فيروسات الرنا، مثل الإنفلونزا، يحتاج تكنولوجيا جزيئية معقدة نسبيًا لكى تنتج إصدارات مختلفة من الجينوم. ولكنها إذا أُنتجت بواسطة التكنولوجيا الحالية فإن إنتاج لقاح سلالة جديدة لا يزال يحتاج أن يُزرع فى بيض دجاج أو فى مزرعة لخلايا ثديية. وهذه التقنيات تحتاج فترة زمنية لكى تحول كائنًا ممرضًا جديدًا إلى لقاح. وتتبنى أكثر التخطيطات للقاح فائدةً على نوع التهديد الذى سوف يواجهه اللقاح كإجراء مضاد، وبالذات مدى فورية التهديد. وبهذا فإن استخدامات اللقاح عندما يكون التهديد وشيكًا تحددها الفترة الزمنية التى يحتاجها إنتاج اللقاح وتوزيعه.

جدول (٩-٢) أنواع اللقاح

لقاحات طبيعية

فيروسات معطلة	يتم تعطيل المُمْرِض بالأشعة فوق البنفسجية أو بالإفساد الضوئى أو بالتعديل الكيميائى (مثال: الإنفلونزا).
فيروسات مستضعفة نشطة	فيروسات حية تستثير استجابة مناعية وقائية ولكنها غير مُمرِضة. وغالبًا ما تُنتَجُ «بتمرير» الفيروس فى أنواع أخرى من العوائل لعدة أجيال، مما ينتج بديلاً به عدد كبير من التطفرات وبذلك تقل درجة الإمراضية (مثال: لقاح الحصبة والغدة النكفية والجديرى MMR.

لقاحات تخليقية

لقاحات فرعية	بروتينات معاد تكوينها منتجة بواسطة جينات المُمْرِض المدمجة فى نواقل عارضة.
جسيمات شبيهة بالفيروسات	جسيمات فيروسية تحوى بروتينات مُمرِضة ولكن بدون دنا وغير قادرة على التكاثر.
نواقل جرثومية	فيروسات أو جراثيم غير مؤذية تحمل جينات تحمل شفرة صناعة بروتينات غلاف المُمْرِض والتى تحفز استجابة مناعية ضد المُمْرِض كله.
لقاحات الدنا، وتعرف أيضًا باسم لقاحات الجينات	بلازميدات دنا عارية، أو بلازميدات معبأة فى فيروسات، تحوى جينات تحمل شفرات لتكوين بروتينات المُمْرِض.

النطاق الزمنى والاستجابة السريعة

تشير النماذج الوبائية الحديثة إلى أن برامج اللقاح الجماعى سوف لا تخفض بصورة مؤثرة من أعداد المصابين بالعدوى إلا إذا بدأت فى نطاق ٩٠ يومًا من بدء وباء للإنفلونزا، ولن تقل نسبة الإصابة والوفيات إلا بصورة هامشية إذا بدأت بعد ١٢٠ يومًا[٣٨]. وبناءً على ذلك فإن المقدرة على العمل السريع هى أمر جوهرى من وجهة نظر الأمان البيولوجى.

وأخيرًا منحت وزارة الصحة والخدمات الإنسانية الأمريكية أكثر من بليون دولار لمؤسسات تعمل على إنتاج اللقاحات فى مزارع أنسجة، مع أمل فى إنتاج أسرع وبكميات أكبر. غير أن الدفع بالقدرات الإنتاجية سوف يستغرق سنينًا، لأن القدرات لابد وأن تعززها فى النهاية أسواق تنافسية على لقاح الإنفلونزا السنوى، الذى أصبح لسنوات فى مرحلة «إغراق» فى الولايات المتحدة[٣٩]. وفى حين تسهم مزارع الأنسجة بالفعل فى تنويع القاعدة التكنولوجية لإنتاج اللقاحات السنوية، إلا أن ذلك لا يؤدى بالضرورة إلى تحسين سرعات تطورها.

ومن الناحية التاريخية، كانت سلالات اللقاحات الجديدة الحية منها والمستضعفة تُعامَلُ بوصفها صياغات جديدة تمام الجدة، تستدعى اختبارات كاملة للأمان والكفاءة، مما يطيل كثيرًا من الأمد الزمنى بين اكتشاف المرض وتوفر اللقاح. وحتى مع التراخى فى تطبيق المتطلبات التنظيمية الذى يصاحب ظهور جائحة عالمية، نجد أن النطاق الزمنى الذى يحدده الخبراء الأكاديميون ومسئولو الحكومة لظهور لقاح جديد ضد الإنفلونزا فى الأسواق هو ستة أشهر. غير أن إنتاج لقاح جديد مبنى على الزراعة فى البيض أو زراعة الأنسجة قد يستغرق من الناحية الفعلية ما قد يصل إلى تسعة عشر شهرًا[٤٠]. ويعنى ذلك أنه عندما يظهر ما يشير إلى أن سلالة بعينها من مُمْرِضٍ ما قد باتت تشكل قلقًا، فإن إضافتها إلى مجموع اللقاحات المستخدمة قد يستغرق سنة إلى سنتين مستقبليتين. وفى حالة التفاجؤ بالوباء فقد تكون البنية التحتية للإنتاج الحالى

للقاح أبطأ بكثير من أن تشكل مساعدة فى مجابهة الموقف. ولحسن الحظ توجد حالياً بالفعل الأدوات اللازمة لبناء لقاحات تخليقية.

وفى حالة نشوب جائحة عالمية للإنفلونزا، فإن فى الإمكان استخدام نفس الأدوات التى استُخدمت لإعادة تكوين فيروس إنفلونزا ١٩١٨ من أجل تخليق سريع للقاح. ويمكن استخدام البنية التحتية لتخليق الجينات، وهى التقنية التى شُجبت بوصفها تشكل تهديداً للأمان، للاستخدام فى حالة لقاحات الدنا. ويمكن استخدام تقنيات مماثلة لانتقاء المادة الوراثية من مُمْرِضات أخرى فى استراتيجيات متعددة ومختلفة لإنتاج لقاحات. غير أن تلك التقنية لم يتم إتقانها بعدُ. ونجد أن لقاحات الدنا تشكل الجيل الأول الحقيقى لمشروعٍ بيولوجيٍ تخليقيٍ؛ ليس بسبب أن اللقاحات ذاتها قد بُنيت بواسطة إعادة تشكيل الجينات الموجودة وتخليق جينات جديدة فحسب، وإنما لأن القواعد التى تحكم الاستجابة المناعية لتلك اللقاحات غير مفهومة تمام الفهم بحيث يمكنها أن تحسم التصميم. وسوف يتحسن كل ذلك بصورة مثيرة فى العقد القادم.

وحديثًا ثبتت إمكانية استخدام النواقل الفيروسية لنقل لقاحات الدنا المضادة لـ «إتش٥إن١» فى الفئران والدواجن، وأُنتج اللقاح *فى أقل من أربعة أسابيع* بعد التعرف على سَلسَلة المُمْرِض[٤١]. ونتوقع نتائج من التجارب الإكلينيكية البشرية خلال السنوات القليلة القادمة، والإستراتيجيات العامة مجهزة أحسن تجهيز للتوزيع الفورى للتدابير المضادة للمُمْرِضات السريعة الظهور سواء منها المُمْرِضات الطبيعية أو الاصطناعية.

وباختصار، نجد أن إستراتيجية إنتاج لقاحات الدنا المنتشرة قد تسير على النهج التالى فى المستقبل القريب: يبدأ الأمر بعزل وسَلسَلة المُمْرِضات الطبيعية أو الاصطناعية باستخدام التكنولوجيا والبنية التحتية المعاصرة[٤٢]. وفى حالة الفيروسات الجديدة أو السلالات القاتلة التى تعاود الظهور بوجه خاص، قد يتطلب الأمر استخدام بعض أساسيات البيولوجيا الجزيئية للكشف عن الجينات الفيروسية التى لا يجب

استخدامها فى صنع اللقاح. ففيروسات إيبولا وماربورج والإنفلونزا، على سبيل المثال، تحوى سَلْسَلات تؤدى عند تنشيطها إلى تثبيط الاستجابات المناعية البشرية ضد الفيروسات. وبمجرد التعرف على الجينات المناسبة لأن تُدرَجَ فى لقاح، تصبح السَلْسَلات متاحة لصناع التخليق ثم تُنقَلُ إلكترونيًا إلى أنحاء العالم. وعندئذ يقوم صناع التخليق بتصنيع البلازميدات الناقلة للقاح والتى تحوى جينات المستضدات (مولدات الأجسام المضادة)، وبعد ذلك يأتى التوزيع على السكان المحليين.

وبدلاً من انتظار نمو المُمْرِضات نفسها لاستخدامها فى صناعة اللقاح، علينا أن نسرع الخطى بتطوير التقنيات التى تعطى معلومات السَلْسَلة مباشرة إلى اللقاحات المنتشرة بتوسع[٤٣]. وبصورة أكثر عمومية، لا نملك فى الوقت الحالى القدرات على الاكتشاف السريع للتهديدات، ولا لفهمٍ سريعٍ لبيولوجيا الكائنات الجديدة، ولا لاستخدامٍ سريعٍ لتلك المعلومات فى تصنيع التدابير المضادة وتوزيعها. وأخيراً، ونعود إلى احتمالات المُمْرِضات الاصطناعية، علينا أيضًا أن نستعد ليوم تكون الأيادى البشرية قادرة على إنتاج تهديدات على نفس درجة خطورة تهديدات الطبيعة.

لا مناص من انتشار المهارات والعتاد

عندما نشأت سنة ١٩٩٠ وسائل إمكانيات السَلْسَلة فى مركز أبحاث الجينوم فى معهد وايتهد (واسمه الآن معهد برود) كانت غالبية العاملين علماء من حملة الدكتوراه المتخصصين فى تحضير الدنا. وبمرور السنين حل حملة درجة الماجستير تدريجيًا محل حملة الدكتوراه، ثم حل خريجون ومساعدون محلهم. ونجد فى الوقت الراهن أن العديد من الطاقم المسئولين عن عمليات السَلْسَلة اليومية لم يحصلوا إلا على تدريب لمدة ستة أشهر فى كلية محلية[٤٤]. وهؤلاء المساعدون الفنيون مدربون

على كل الخطوات اللازمة من استخلاص الدنا من العينات الواردة إلى معلومات السَلسلة الصادرة من المعهد، بما فى ذلك تخليق جراثيم تحوى دنا مأخوذاً من كائنات أخرى.

وعلى الرغم من النتائج المبهرة التى جاء ذكرها فى الفصول السابقة، فإن غالبية الطلبة والمبتدئين من قراصنة الجينات أفضل كثيراً فى تصور دوائر جينية جديدة ونمذجتها عن أن يبنوها واقعياً بأنفسهم. وفى حين تتفوق مهارات التصميم على الخبرات العملية، إلا أن صناديق الأدوات الموجودة تجارياً تشمل وصفات مبسطة تتيح نقل الجينات بين الكائنات. وقد تكون العملية أشد قليلاً فى تعقيداتها عن خَبز البسكويت، ولكنها فى غالبيتها أقل تعقيداً من صنع النبيذ أو الجعة. ومن الطبيعى أن هذا الانتشار الواسع للتكنولوجيا البيولوجية يفضى إلى تساؤلات عن كيفية تطبيقها.

ويشكل الجدل حول من سيُسمَحُ له بالدخول إلى أى تكنولوجيا بيولوجية واحداً من أهم نقاشات القرن الحادى والعشرين. ومن غير المحتمل أن تنظيم قواعد المهارات سوف تنتج عنها أية زيادة فى أمان الجمهور. ولقد ارتفع الطلب الصناعى على العاملين المهرة فى التكنولوجيا البيولوجية فى الولايات المتحدة بنسبة ١٤-١٧ بالمائة أثناء تسعينيات القرن العشرين، وأتى الكثير من هؤلاء العاملين من وراء البحار[٤٥]. ولن يستقر كل هؤلاء فى الولايات المتحدة، ونستطيع أن نقول باطمئنان: إن العديد من الذين سيغادرون سوف يوظفون مهاراتهم فى أماكن أخرى. فإن عمدت حكومة الولايات المتحدة إلى تحجيم ممارسة وسائل بعينها، فإنه لن يكون أمراً واقعياً أن تراقب مركزياً تحركات كل شخص ماهر فى القطر. ومن المرجح أن نفس الشىء ينطبق على أى قطر آخر. ومما لا ريب فيه أننا لا نستطيع أن «نمنع تعلم» المهارات ذات الصلة بالموضوع لكى نمنع الاستخدامات غير المرخص بها، وأى تصرف يهدف إلى تحجيم انتشار المهارات سوف يفضى إلى إصابة هذا الجزء من الاقتصاد الذى يعتمد على التقنيات البيولوجية بالشلل. وبهذا، ومع نمو الإسهام العام للتكنولوجيا فى

الاقتصاد، فإن أى قيود على التدرب فى هذا المجال قد تؤدى إلى عواقب سلبية اقتصادية وخيمة.

ولعل المشكلة الأكثر فداحةً هى انتشار المواد فى كل مكان. وتعتمد القواعد الفعالة على التطبيق الفعال، والذى يتطلب بدوره اكتشافًا فاعلاً. ويعطينا مدى انتشار إنتاج الأدوية غير القانونية فى الولايات المتحدة والإخفاق فى السابق فى اكتشاف الإنتاج غير المشروع للأسلحة البيولوجية، تعطينا بعض المؤشرات عن التحديات التى تواجه الاكتشاف والتطبيق فى ظل تكنولوجيات واسعة الانتشار.

ويشير انتشار التقطير غير المشروع للكحول أثناء فترة منع الكحوليات فى الولايات المتحدة وانتشار معامل التخليق الحديث غير القانونى المخدرات إلى أن قاعدة تحريم المنتجات الكيماوية لا يؤدى إلا إلى خلق سوق سوداء، وهى أصعب فى مراقبتها وتنظيمها عن الأسواق المفتوحة. والمعارف الكيميائية المطلوبة لإنتاج المخدرات ليست أقل تعقيداً إلا بقدر ضئيل عما يتطلبه التلاعب الجينى بالكائنات. وإذن، فالخبرات فى تنظيم إنتاج واستخدام المخدرات غير المشروعة هى مسألة مرجعية لأى جهد مماثل لتنظيم التكنولوجيات البيولوجية.

إن تخليق المركبات الممنوعة هى أمر واسع الانتشار. ولقد تمت مداهمة ما يقارب ثمانية آلاف معمل سرى لتصنيع مادة «ميثامفيتامين» (المخدرة)، فى الولايات المتحدة خلال عام ٢٠٠١، وينتج ما يزيد على ٩٥ بالمائة من المعامل العائلية، أى التى يديرها أفراد عائلة واحدة، أقل من خمسة كيلوجرامات فى اليوم[٤٦]. وقد انخفضت انخفاضاً كبيراً أعداد المعامل المنتجة لمادة «ميثامفيتامين» فى الولايات المتحدة منذ عام ٢٠٠٠، ويعود ذلك فى المقام الأول إلى القيود المحلية المفروضة على الكيماويات الأم والتطبيقات الصارمة للقوانين، وكذلك ارتفعت شدة الأحكام القضائية المتعلقة بالميثامفيتامين بشكل كبير[٤٧]. وارتفعت كميات الميثامفيتامين التى ضبطتها وكالة تنفيذ قوانين المخدرات وتراوحت حول ١٧٠٠ كيلوجرام منذ سنة ٢٠٠٠ [٤٨]. وفى سنة ٢٠٠٦[٤٩] انخفض بصورة حادة عدد «القضايا الخاصة بالمعامل السرية» المتعلقة بالميثامفيتامين. غير أن

الانخفاض الذى ترتب على ذلك فى إنتاجية المعامل العائلية قد تَعَوَّضَ بأكثر منه من جراء تزايد التصنيع المركزى المحلى والواردات من الخارج، ويبدو أن كليهما تقعان تحت سيطرة مؤسسات إجرامية مركزية ضخمة[٥٠]. ولا يزال استهلاك الولايات المتحدة من الميثامفيتامين فى تصاعد، وغالبيتها تأتى من خارج البلاد؛ وفيما بين (٢٠٠٢-٢٠٠٤) ارتفعت الكميات المضبوطة على الحدود الأمريكية-المكسيكية بما يربو على ٧٥ بالمائة[٥١].

ووفقًا لما جاء بتقرير «تقدير الأخطار القومية للمخدرات» الصادر سنة ٢٠٠٧ من «وكالة تطبيق قوانين المخدرات»، فإنه يبدو أن الزيادة فى الإنتاج الأجنبى تركز التكنولوجيا والبنية التحتية لعمليات الإنتاج والتوزيع داخل منظمات الاتجار فى المخدرات: "إن النجاح الباهر الذى نجح فى تقليص الإنتاج المحلى من الميثامفيتامين من خلال ضغوط تطبيقات القانون والقيود القوية المفروضة على مبيعات المواد الكيماوية الأم قد مكنت المنظمات المكسيكية للاتجار فى المخدرات من التوسع السريع فى سيطرتها على توزيع الميثامفيتامين[٥٢]».

والقواعد إذن قد تسببت فى التحول من إنتاج محلى موزع إلى إنتاج أجنبى مركزى يتبع منظمات إجرامية. وكان من نتيجة تركيز الإمكانيات ورأس المال إتاحة الفرصة أمام منظمات الاتجار فى المخدرات للشروع فى برامج مستقلة معقدة لتطوير التكنولوجيا تبتكر فى مجالات إنتاج المخدرات وتمويلها وتوزيعها. ومن أجل الإفلات من دوريات التفتيش الجوية والبحرية عمد مهربو المخدرات أخيرًا إلى استخدام غواصات مصنوعة محليًا على شواطئ أستراليا وأوربا وأمريكا الوسطى والولايات المتحدة. وقد ضُبطت إحدى تلك الغواصات قبل إتمام صنعها وتبين أنها قادرة على نقل حمولة تبلغ مئتى طن مترى فى الرحلة الواحدة وكانت تُبنى وفقًا لتكنولوجيا متقدمة وعلى درجة عالية من جودة الصناعة[٥٣]. وبدءًا من ربيع ٢٠٠٨، صارت تقارير الوكالات المعنية بتطبيق القانون تتحدث عن مشاهدة عشر غواصات من هذا النوع فى المتوسط كل

شهر، ولا تزيد نسبة ما تنجح الوكالات فى اعتراضها من تلك السفن على عشرة بالمائة، وليس واضحًا كم تشكل نسبة ما يشاهد منها إلى مجموعها(٥٤).

ويتفق الإنتاج المركزى والتدفق المتزايد للمخدرات عبر حدود الولايات المتحدة مع مقولة أن جهود الشرطة داخليًا فى الولايات المتحدة تشجع على خلق سوق سوداء مدروسة، ومن الجلى أنها بالغة الكفاءة، لشبكات لإنتاج المخدرات وتوزيعها. ونخلص من ذلك إلى أن تزايد الجهود الرامية إلى تطبيق القانون تؤدى بصورة تناقضية إلى إنتاج بنية تحتية ترى «وكالة تنفيذ قوانين المخدرات» أنها "أصعب على السلطات المحلية فى التعرف عليها والتقصى عنها وتفكيكها لأنها أكثر تنظيمًا وخبرةً من المنتجين والموزعين المحليين المستقلين"(٥٥). وبالإضافة إلى الصعوبات المادية البسيطة التى تكتنف تطبيق القانون ضد منتجى المخدرات وموزعيها، نجد أن ثمة حافزًا اقتصاديًا قويًا للمنتجين كى يحاولوا الإفلات من تلك القوانين.

ويتسبب ميثامفيتامين فى مشاكل طبية جسيمة للمتعاطين، كما أن الأمراض الاجتماعية والأنشطة الإجرامية المصاحبة يترتب عليها تكاليف اقتصادية باهظة. ومن الجلى أن الخروج من هذا المأزق ليس أمرًا سهلاً. وتكمن المشكلة فى أن بعض الناس مستعدون أن يدفعوا نقودًا فى سبيل منتج غير قانونى وخطير لتكنولوجيا منتشرة، وأن آخرين مستعدون أن ينتجوه، بالرغم من العواقب القاسية لكل من المستخدمين والمنتجين.

الوعد المزيف بالتنظيم

ما دام هناك أسواق فسوف تكون ثمة محاولات لتزويدها بالسلع، حتى ولو كان المنتَج غير قانونى ويواجَه بالتقطيب الحضارى. وعندما يكون المنتَج المعنى غالى الثمن، سواء كان ثمنًا ماليًا أم سياسيًا، فإن أموالاً هائلة سوف تتدفق من أجل إنتاجه وتوريده. وتنطبق هذه المقولة على التكنولوجيا البيولوجية بمثل انطباقها على المخدرات

غير المشروعة، وهى مقولة صحيحة على المستوى الدولى بمثل صحتها على المستوى المحلى فى أية دولة.

والأمثلة العديدة على فشل الاستخبارات والقانون تشكل تحديات واضحة لمقولة أن الأخطار التى تشكلها الأخطاء أو تعمد الأذى المتعلقة بالتقنيات البيولوجية يمكن التخفيف منها من خلال القوانين. والشىء الأكثر ارتباطًا بأخطار التكنولوجيا البيولوجية هو عجز عدد كبير من أجهزة الاستخبارات الغربية عن اكتشاف وجود برامج واسعة النطاق لأسلحة بيولوجية فى العراق قبل حرب الخليج الأولى(٥٦). وفى حديثه عن مقدمات حرب الخليج الثانية، ذكر ريتشارد سبرتزل، وهو مفتش متمرس للأسلحة البيولوجية وله خبرة سنوات طويلة فى العراق، ذكر أنه "علم من مصدر موثوق أن العراق نقلت غالبية برنامجها للأسلحة البيولوجية إلى وادى بكة فى لبنان منذ أوائل ٢٠٠٣"(٥٧). وفى الإطار الأشمل للأمور، وبخاصة فى إطار الجدل حول مدى دقة أجهزة الاستخبارات فيما يتعلق ببرامج أسلحة العراق قبل ٢٠٠٣، فإن صحة هذا الادعاء ليست مهمة ولا ذات صلة بحديثى.

وبغض النظر عن وجود برنامج للأسلحة البيولوجية من عدمه، أو أنه نُقِل إلى خارج العراق قبل غزو ٢٠٠٣، فإن مفتش أسلحة متمرسًا آمن بصحة تلك الادعاءات بحيث كررها فى السجلات. ومعنى ذلك أن التكنولوجيا والمهارات منتشرة على نطاق واسع بحيث يصبح من السهل على خبير أن يصدق أن منشئات إنتاج للأسلحة البيولوجية قد باتت بالفعل أبعد من أن تصل إليها الإمكانات الهائلة لمجتمع أجهزة الاستخبارات الدولية. وفى عالم من اليسير فيه إخفاء منشآت إنتاجية، كيف يتأتى لنا أن نمنع الأسواق السوداء للمواد غير المشروعة؟ وكيف نتمكن من تضييق الخناق على الوصول إلى التقنيات المستخدمة فى إنتاجها؟

ومع القوة الكامنة فى التكنولوجيات البيولوجية، يستحق الأمر أن نبحث فيما إذا كانت الأسواق المفتوحة مفضلة على الأسواق السوداء التى لا مناص من ظهورها مع

ظهور القوانين. وسوف تكون هذه الأسواق السوداء بالضرورة فوق القوانين. والأهم من ذلك أنها، في هذه الحالة، ستكون غير شفافة.

ولا يكمن التهديد الحقيقي الناتج عن انتشار التقنيات البيولوجية لا في تطويرها ولا في استخدامها في حد ذاته، وإنما في حقيقة أن الأنظمة البيولوجية قد تكون محل تعديلات، سواء عَرَضية أو متعمَّدة، بدون علم أولئك الذين قد يصيبهم الضرر من جراء ذلك. ولما كان ذلك قد يشمل أعداداً ذات شأن من البشر والحيوانات أو النباتات، فإن ذلك يقتضي منا أن نضاعف معرفتنا بنوعية التجارب التي تجرى حول العالم.

وينظر بعض المراقبين إلى انتشار التكنولوجيا التي تفيد في التلاعب بالأنظمة البيولوجية بوصفها خطراً فورياً داهماً: وتدور مناقشات محمومة تنادي بالإبطاء من وتيرة الأبحاث بل وتجنب بعضها تجنباً تاماً. وتنادت الأصوات عالية بألا "نطلق المارد من القمقم" فلا قِبَلَ لنا بمواجهة العواقب. وكانت تلك الأصوات قد انطلقت منذ سنوات في مجالات أخرى وقُصِد منها إطلاق أجراس الإنذار حول البحوث البيولوجية.

فإذا كانت القيود الصارمة التي تُفرض على النفاذ إلى التكنولوجيا تحمل آمالاً في حماية حقيقية، فإنها تستحق النظر. غير أن تلك القيود بطبيعتها مليئة بالثغرات، وهي أقرب إلى أن تكون وسيلة لإدارة الأمور وليست مظلة للحظر. ومن المؤكد أنه لم يحدث مطلقاً أن شأفة نوع من أنواع الجريمة قد *استؤصلت* من خلال الحظر. غير أن ما هو أهم من أي أمن هش تتيحه القوانين، هو الأخطار المحتملة للجهل المقنن. وعلينا أن نقرر ليس ما إذا كنا راغبين في المخاطرة بأن نصاب بالدمار الذي تسببه التكنولوجيا البيولوجية وإنما ما سيحدث في السنوات المقبلة إذا ما تم تحجيم التوجه العام للبحوث البيولوجية، وعما إذا كنا سنكون قادرين على التعامل مع نتائج الأفعال الشريرة أو الأخطاء. وعلينا أن نقرر إذا كنا راغبين في أن نعرض أنفسنا لمخاطر عدم الاستعداد.

وكل ما سوف يتمخض عنه تحجيم البحوث هو أننا سنكون أقل استعداداً للظهور المحتوم لتهديدات بيولوجية جديدة طبيعية واصطناعية. ويضاف إلى ذلك، أنه من السذاجة بمكان أن نظن أننا سننجح في تحجيم الوصول إلى المعارف الحالية ذات الصلة في إطار هيكلنا السياسي والاقتصادي الحالي.

وفي حين أن تطوير الأبحاث والتجهيزات الأكثر تقدماً قد يحدث أول ما يحدث في الدول المكتملة التصنيع مثل الولايات المتحدة، حيث يمكن السيطرة على الصادرات، إلا أن دولاً أخرى تطور قاعدة مهارات سوف تتيح استخداماً محلياً عريضاً للتقنيات البيولوجية. ويشكل التوسع في المشاركة في مسابقة «آي جِم» في حد ذاته مقياساً استثنائياً للشهية المتفتحة للتقنيات البيولوجية الجديدة في أرجاء العالم (الفصل السابع). ولم يكن من قبيل المصادفة أن الصين قدمت فريقين من أفضل ستة فرق في مسابقة «آي جِم» سنة ٢٠٠٧.

لدى الصين برنامج مشاكس في التكنولوجيا البيولوجية للنبات، رفعت تمويله السنوي من ٨ ملايين دولار إلى ٥٠ مليون دولار بين ١٩٨٦ - ١٩٩٩[٥٨]. وفي سبتمبر ٢٠٠٨ أعلنت عن خطة جديدة لإنفاق ما لا يقل عن ٣ بلايين دولار بحلول ٢٠٢٠، وبعد أن أعلن ذلك رئيس وزراء الصين ون جياباو أمام الأكاديمية الصينية للعلوم قال: "لكي نحل مشكلة الطعام علينا نعتمد على التدابير الكبيرة للعلم والتكنولوجيا، وعلى التكنولوجيا البيولوجية، وعلى التعديلات الجينية"[٥٩]. ويوجد هذا الاستثمار المفعم بالنشاط في القطاع الخاص الصيني، ونال مكافأته على صورة زيادة سنوية مقدارها ٣٠ بالمائة في معدل النمو السنوي لقطاع الأدوية البيولوجية بين سنتي ٢٠٠٠ و٢٠٠٥ [٦٠]. وتخطط المؤسسة القومية العلمية لإغراء العلماء الصينيين المدربين بالخارج على العودة بعرض صفقات مالية دسمة[٦١]. وأول علاج جيني نال موافقة حكومية متاح ليس في الولايات المتحدة ولا في اليابان ولا في أي مكان في أوربا وإنما في الصين [٦٢]. وكان رئيس وزراء سابق قد ذكر علانية أن الحكومة سوف تستخدم كل الوسائل المتاحة لديها لتحسين مستوى صحة السكان، بما في ذلك تعديل

جينات المواطنين [٦٣]. وهناك دول كثيرة أخرى تعمل على استغلال قدراتها دون مساعدة من أحد لتطوير التقنيات البيولوجية واستخدامها.

زادت الهند من تمويلها لمركزها القومى للتكنولوجيا البيولوجية بمقدار ثلاثة أضعاف، وهى تهدف إلى إنفاق ثلث ميزانية الأبحاث على التكنولوجيا البيولوجية، وهى تروج لتطوير المحاصيل المعدلة جينيًا واستخدامها فى كل أنحاء آسيا [٦٤]. ودأبت سنغافورة لسنين طوال على استئجار علماء أجانب [٦٥]. وتستثمر تايوان مبالغ كبيرة فى التكنولوجيا البيولوجية وهى تبحث عن مواطنين لها فى الخارج كى يعودوا إلى أرض الوطن لكى يبنوا التكنولوجيا البيولوجية فى الدوائر الأكاديمية والصناعية [٦٦].

وفى ظل تلك التطورات، وفى إطار تزايد القدرات الفردية والانخفاض المستقل فى التكلفة، فإنه من غير الواقعى أن نظن أن التكنولوجيا البيولوجية يمكن أن تتقوقع داخل حدود دولة بعينها. وحتى لو طُبق مثل ذلك النظام، فلن يتمخض إلا عن مجرد تضمين دول لديها بالفعل تكنولوجيتها الخاصة. وليس بمقدورنا أن نفعل شيئًا يُذكر فى سبيل انتزاع التكنولوجيا من أيدى الذين طوروها وتستقر عندهم. وأفضل إستراتيجية قادمة هى فى حقيقة الأمر تشجيع تلك الجهود على جميع المستويات وفى مناخ منفتح.

وفى ضوء انتشار تكنولوجيا تخليق الجينات ومهاراتها التى تناولناها فى الفصل السادس، من الجلى أن أية محاولة للتنظيم يتعين أن تكون داخل إطار دولى حتى يمكن تنفيذها. وهناك مجموعة صغيرة من المشاركين الأكاديميين والصناعيين النشطاء فى مجالات تطوير وتسويق تكنولوجيات التخليق يحاولون أن يستبقوا الأحداث فى هذه الجبهة. ويقترح البيان التمهيدى للجمعية الدولية لتخليق النيوكلوتيدات ما يلى:

> **كجزء من عملية تحسين تكنولوجيا تخليق الدنا، نجد أنه من الأمور الحتمية أن الشركات المختصة بتخليق الدنا يتعين عليها أن تطور وتطبق إجراءات مؤثرة للأمان البيولوجى، مع احتفاظها بقدراتها على إنتاج منتجات رفيعة**

المستوى بأسعار متدنية مع سرعة فائقة فى تسليم المنتجات. ولن تتحقق الاحتمالات البناءة لتكنولوجيا تخليق الدنا بكامل قوتها إلا إذا نشأ إطار حاكم يتفق مع احتياجات الصناعة والعملاء، ويساند أفضل ممارسة للأمان البيولوجى والأمن، بما فى ذلك الردع الفاعل والمراقبة لأى استخدام إجرامى للدنا المخلق.

إن وجود إطار حاكم يعيق التطور التجارى المفتوح لتكنولوجيا التخليق من شأنه أن يؤخر مسار البحث العلمى ويجعل تحديات التطور المسئول للتكنولوجيا أكثر صعوبة. وبالمثل، نجد أن وجود إطار تنظيمى يعطل الأسواق التجارية لبلد ما أو مجموعة من البلدان دون توافق عالمى سوف يدفع العملاء تجاه أسهل وأرخص مصدر متاح أمامهم، وسيكون محدود التأثير على تعزيز الأمان العالمى (٦٧).

وتلك التوصيات قد أملتها الرغبة فى الأمن والأمان، وسرعة مسيرة الابتكارات التكنولوجية، والانتشار العالمى الواسع النطاق لتقنيات تخليق الدنا وطرق تجميع الجينات. وفى هذا الإطار، نجد أن تطبيق قواعد لتنظيم تكنولوجيا هى بالفعل واسعة الانتشار، يدفع مستخدمى تلك التقنيات إلى الابتكار، مثلما يثبت مثال إنتاج المخدرات غير المشروعة.

سوف يكون تنظيم العمل فى المعامل على نفس إشكالية تنظيم المركبات الكيماوية. وكانت مواد «قانون المواطن الأمريكى» (USA Patriot Act) مقصوداً منها رفع مستوى الأمان البيولوجى فى المعامل التى تتعامل مع جراثيم معينة، بفرض إجراءات مادية للأمن والتحقق من خلفية العلماء، مع احتمالات فرض قيود على الدخول إلى المعلومات حسب جنسية العالم. وكان من بين أوائل نتائج تمرير هذا القانون انخفاض أعداد الباحثين فى القطر الذى كانوا يعملون فيه على فهم الكائنات المسببة للأمراض. وفى حديث صحفى مع جريدة «نيويورك تايمز» تحدث روبرت ريتشاردسون الحائز على جائزة نوبل بأسف شديد عن نتائج التشريعات على البحث فى المعهد الذى يعمل فيه

وهو جامعة كورنل، التى فقدت فى التو ستة وثلاثين من أصل ثمانية وثلاثين باحثًا موهوبًا كانوا يشتغلون في جراثيم قاتلة: "لدينا الآن أفراد أقل عددًا بكثير يعملون على تلقيح الجمهور ضد مرض الجدرى وفيروس غرب النيل والجمرة الخبيثة (الأنثراكس) وغير ذلك من ثلاثين وباء آخر"(٦٨). ومن العسير أن نقرر كيف سيؤدى ذلك إلى تحسين فرص التعامل مع المُمْرِضات البازغة أو التى تُطلق عمدًا. وفى الحق، فإن النكتة تقول إن زيادة القوانين سوف تفضى إلى زعزعة الأمان.

فإن كانت القوانين ليست فقط خيارًا غير فاعل وإنما ستشكل إعاقة حقيقية للأمان، فكيف سنتمكن من تخفيف التهديدات القادمة؟ ومن الجلى أن الهدف هو مقاومة الأخطاء فى المعمل والأسلحة المخلقة من مكونات بيولوجية، وكذلك، وهو الوضع المثالى، جعل التهديدات غير ذات شأن قبل أن تتحول إلى مشكلة.

وقد تتصرم عقود طويلة قبل أن يكون فهمنا للبيولوجيا متسقًا مع متطلبات سرعة الاكتشاف والتحليل والاستجابة. ولحسن الحظ، لعله يكون صحيحًا أيضًا أن لدينا بعض الوقت للاستعداد قبل أن تصبح التكنولوجيا والمهارات واسعة الانتشار حقًا. وفى غضون ذلك، تستطيع كل الأطراف المعنية أن تتعاون معًا لوضع أسس زيادة الأمن من خلال تحسين وسائل الاتصال بشكل كبير وتطوير التكنولوجيا الموجهة. ويتعين علينا أن نزن بكل دقة تأثيرات أية قوانين يتم سنها فى المستقبل القريب.

الفصل العاشر

منابع الابتكار وتأثيرات القوانين الحالية والمقترحة

كيف نزيد من سرعة تطور التكنولوجيا ونصل بها إلى الحد الأقصى فى ذات الوقت الذى نحسن فيه من الأمن المادى والاقتصادى؟ إن خلق أدوات ووسائل جديدة والتسويق لها هى عملية معقدة. وثمة فرق هائل بين إثبات القدرة على أداء وظيفة معينة فى المعمل وإنتاج منتَجٍ يود الناس أن يستخدموه فى العالم الحقيقى. ومثلما كانت الحال فى التقنيات التى نوقشت فى الفصول السابقة، تلعب السياسات الحكومية وتوافر التمويل دوراً مهمًا فى نقل البيولوجيا من المعمل إلى الاقتصاد. وفى تناولنا للكيفية التى نشجع بها تطوير تقنيات جديدة، نجد أنه من المفيد أن نستكشف أين ينشأ الابتكار.

ما الابتكار، ومن أين يأتى؟

الاختراع شىء والابتكار شىء آخر. وقد وُصِف الاختراع بأنه الاستيلاء على ظاهرة طبيعية واستخدامها بأيد بشرية، أو بناء شىء يؤدى مهمة جديدة[١]، وقد يُصنَّف الابتكار ضمن الاختراع ولكنه يتناول بصورة أعم وأشمل العملية المتكاملة للتحول من فكرة إلى شىء مفيد خارج المعمل. ويتم التغاضى عن التمييز بينهما فى الكتابات الاقتصادية، مفضلين الحديث المبسط عن «الابتكار». ويعود السبب الرئيسى لذلك إلى أن علوم الاقتصاد التقليدية تنزع إلى فهم الأسواق من منظور الثمن وحده.

غير أن الأسواق لا تملك وسائل ذاتية لتحديد قيمة للاختراعات، ناهيك عن آلية للتفرقة بين قيمة الاختراعات وقيمة الابتكارات. غير أن كلا النشاطين ضروريان كي تشق التقنيات والعمليات والمنتجات الجديدة طريقها من المعمل إلى المستهلك.

ويرجع تاريخ المناقشات النظرية حول العلاقة بين الاختراع والابتكار على أقل تقدير إلى جوزيف شومبيتر (Joseph Schumpeter) في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين. وفي زمن أكثر حداثة، دفع وليم بومول (William Baumol) الاقتصادي بجامعة نيويورك بالنقاش قُدُمًا بمحاجاته بأن "الأنشطة الخاصة الابتكارية قد انقسمت بقوى السوق بين شركات صغيرة وكبيرة، وتتجه كلٌ منها إلى التخصص في جانب مختلف من المهمة":

> **وحتى مع حقيقة أن غالبية إنفاق القطاع الخاص على البحوث والتطوير R(esearch & Development R&D) يأتي من مؤسسات أعمال عملاقة، إلا أن حصة حاسمة من الاختراقات الابتكارية في القرون الحديثة أسهمت بها مؤسسات ذات حجم جد متواضع. ثم بيعت هذه الاختراعات الجذرية أو أُجِّرت أو وُضعت بأية وسيلة في أيدي الشركات العملاقة، التي شرعت في تطويرها - مضيفة إلى قدراتها والثقة فيها وحميميتها مع المستهلك وبصورة عامة قابليتها للتسويق - فحولتها إلى منتج استهلاكي جديد بَدَّلَ من طريقة حياة الأمريكيين(٢).**

ويقرر بومول أن "قائمة الابتكارات (التي تمت على يد الشركات الصغيرة) تغطي حرفيًا المجال الأبجدي من الألف إلى الياء"؛ ويشمل الجدول (١٠-١) العديد من تلك الابتكارات(٣).

جدول (١٠-١)

الابتكارات المهمة التى تمت على يد الشركات الأمريكية الصغيرة فيما بين (١٩٠٠ إلى ٢٠٠٠)

- تكييف الهواء
- خدمات الطيران
- الطيران
- شاسيه (هيكل) الجرار المفصلي
- الجلد الصناعي المصنوع من السلوفان
- خطوط الإنتاج أو خطوط التجميع
- شريط التسجيل الصوتى

- الباكليت(*)
- التصوير المغناطيسي البيولوجي
- الإنسولين المخلق بيولوجياً
- تكسير البترول بالعامل المساعد
- السيطرة بالكمبيوتر على ضغط الدم
- الصب المستمر
- آلة جمع القطن
- جهاز إيقاف رجفان القلب

- أخذ بصمة الدنا
- القماش مزدوج النسيج
- جداول البيانات الإلكترونية
- طيران الجناح الحر
- راديو الإف إم
- ماكينة التلقيم الأمامي
- القبة الجيوديسية
- البوصلة الجيروسكوبية
- الصمام الحرارى
- المجس الحرارى
- الهليكوبتر

- الماسح الضوئى ذو الاستبانة العالية (كات سكان)
- الأشعة الرقمية ذات الاستبانة العالية
- الأشعة ذات الاستبانة العالية
- هرمون النمو البشرى
- الفرامل الهيدروليكية
- الدوائر المدمجة
- ليزر تفتيت حصى الكلى
- الحاسوب الكبير
- المدرب الارتباطى
- المعالج الحاسوبى
- المجهر
- الماسح بالرنين المغنطيسى
- الماسح الضوئى
- موانع الحمل بالفم

- المحرك الخلفى للزوارق
- التوزيع الليلى للسلع
- منظم ضربات القلب
- الطباعة الضوئية
- كاميرا البولارويد
- الحاسب المحمول
- الإسمنت سابق الإجهاد
- المساكن سابقة التصنيع
- الشريط الحساس للضغط
- الحاسب القابل للبرمجة
- الطعام سريع التجميد
- آلة القراءة
- ماكينة الحفر الدوارة
- ماكينة الحلاقة الأمنة

- ذراع لروبوت ذو المفاصل الستة
- العدسات اللاصقة اللينة
- ماكينة الصاروخ ذات الوقود الصلب
- ماسح الخرائط المجسم
- مقياس الإجهاد
- الأضواء المبهرة
- الحاسب الفائق القدرات
- الروبوت المتحرك ذو الذراعين
- أنبوب المكنسة الكهربية
- المحول الكهربى متغير المردود
- ليزر إصابات الأوعية الدموية
- التصوير الجاف (زيروجرافي)
- المرقاب (التلسكوب) الإشعاعى
- سوستة الملابس

(*) مادة لدائنية تصنع منها أقلام الحبر وأجهزة التليفونات وغيرها. (المترجم)

تقسيم ذاتى للأعمال

فى حين تبدو الشركات الصغيرة مصدراً مهماً للاختراعات والتقنيات الجديدة، إلا أن الشركات الكبيرة هى المصدر الرئيسى للمنتجات الفعلية. وحسبما يقرر المجلس القومى للعلوم، فإن ما لا يزيد على ١٦٧ شركة كبيرة (بها ما يربو على ٢٥,٠٠٠ موظف) تحملت ٤٦ بالمائة من إجمالى إنفاق الولايات المتحدة على البحوث والتطوير فى سنة ١٩٩٧؛ وتحملت ١٧٣٣ شركة أخرى بها ما يزيد على ألف موظف ٣٤ بالمئة. وفى مجملها بقيت على حالها لا تتغير النسبة التى تتحملها الشركات الكبيرة حتى سنة ٢٠٠٣ على الأقل[٤]، وكون قلة من الشركات البالغة الكبر تنفق ما يقارب نصف ميزانية الولايات المتحدة للبحوث والتطوير ليست علامة على أنهم مبتكرون رديئون بقدر ما تدل على أن الابتكارية اللازمة لجعل المنتجات تخرج من الأبواب فى طريقها إلى المستهلكين هى أمر باهظ التكلفة.

وتشكل صناعة الحاسبات مثالاً ممتازاً على المصدر الذى تأتى منه استثمارات البحوث والتطوير وكيف يجرى إنفاقها. فالمؤسسات الكبيرة تنفق مبالغ ضخمة من المال لكى تجعل المنتجات تعمل، والحكومة الأمريكية تساند جانباً كبيراً من الأبحاث الأساسية سواء فى الأوساط الأكاديمية أو فى الشركات. وطبقاً لتقرير من «المجلس القومى للبحوث» صادر سنة ١٩٩٩ تحت عنوان «تمويل ثورة»:

> **جانب بالغ الصغر من «البحوث والتطوير» الذى يتم فى الصناعة (عامةً) يحدث فى مجال البحوث؛ وفى الحق، فإن الغالبية الساحقة تعتبر تطويراً. وحتى البحث التطبيقى لا يشكل أكثر من (١٠-١٥) بالمئة من «البحوث والتطوير» فى مجال الحاسبات ... ولا تشكل البحوث الأساسية فى الصناعة إلا نحو ٢ بالمائة من إجمالى «البحوث والتطوير». وإذا ما استبعدنا التطوير من حساباتنا نجد أن الدعم الحكومى يمثل نحو ٤٠ بالمائة من مجمل البحوث فى مجال الحاسبات، ونصف ذلك كان فى البحوث الأساسية[٥].**

ونلخص النقاش فيما يلى: يشكل مجال تطوير المنتجات غالبية الإنفاق فى مجال البحوث والتطوير فى الشركات الكبيرة. ومعنى ذلك أن إنفاق البحوث والتطوير غالبيته تطوير، وكما ذكرت جريدة «الإيكونوميست»، "لوقت طويل اعتمدت صناعة الحاسبات، فعلياً، على الشركات الصغيرة فى الجانب الأعظم من أبحاثها"[٦].

ويحتاج السجل التاريخى للاختراعات التى تمت بواسطة الشركات الصغيرة فى ضوء نصيب أكبر للشركات الكبيرة فى الإنفاق فى مجال «البحوث والتطوير»، يحتاج المزيد من الشرح والإيضاح. ويقرر بومول، بانيًا حججه على الملاحظات العملية، أن تقسيم العمل بين الشركات الصغيرة والكبيرة وثيق الصلة بتركيبة نظامنا الاقتصادى. وتجنح الاختراعات والابتكارات إلى أن يتم تنفيذها بطريقة جيدة بواسطة أنواع مختلفة من المؤسسات. والأهم من ذلك، أن تطوير تقنيات جديدة واقعيًا فى اقتصاد قائم على السوق يحتاج ويعتمد *بكل صراحة* على مساهمة الشركات الصغيرة وصغار المستثمرين: "تكاد الشركات الاستثمارية الصغيرة أن تحتكر الجانب من «البحوث والتطوير» المنشغل بالبحث فى الاختراقات الثورية"(٧).

ولكن ما السبب، فى اقتصاد قائم على السوق من المفترض فيه أن المنافسة هى التى تحدد أسعار المنتجات أو الخدمات، ما السبب فى أن المستثمرين يتفوقون فى المنافسة على الشركات الكبيرة ويتحصلون على حصة غير متناسبة من الابتكارات الثورية؟ ثمة إجابة واحدة، كثيرًا ما نسمعها فى هذا العصر عصر خيارات الأسهم والبلايين (العديدة) من الدولارات من العروض العامة المبدئية، وهى أن المستثمرين يتطلعون إلى كسب جائزة اليانصيب الكبرى من خلال العمل الشاق الذى يستمتعون به. وبالإضافة إلى «الجائزة الكبرى لنجم السوق» للمستثمرين الذين يحققون المجد، يقول بومول: إنه لما كان المستثمرون راغبين فى تقبل مردود مادى متدنٍ فى مقابل «المتعة العظمى» متعة تحقيق النجاح، فإنهم بالتالى «قد نالوا مكافأة سخية فى المجمل». وهناك نتائج واضحة تنعكس على قيمة عملهم فى السوق، مما يفسر كلاً من الآلية التركيبية التى تحدد الفوارق بين الأقزام والعماليق واعتماد العمالقة على الأقزام: "إن المستثمر المبتكر المستقل سوف يميل إلى أن يصبح المُوَرِّدَ الاقتصادى للابتكارات الخارقة فى الاقتصاد"(٨).

ويبدو أن هذا التقسيم للعمل سمة عامة فى الصناعات التى تعتمد بقوة على تقنيات جديدة. وهناك تقرير صادر سنة ٢٠٠٦، لصالح إدارة الأعمال الصغيرة تفحص ١٩٢ مؤسسة عامة وخاصة فى مختلف الصناعات على مر أربع عشرة سنة، وجاء فيه:

تتسم الصناعات التى تتزايد فيها التكنولوجيا، ممثلة فى ازدياد أعداد العمالة من العلماء والمهندسين، بتزايد أعداد الشركات الخاصة الجديدة السريعة النمو، بينما لا تتزايد فى تلك الصناعات أعداد الشركات العامة القديمة سريعة النمو. وإضافة لذلك، فإننا نجد أن الزيادة فى التأكيد على الإنتاج فى تلك الصناعات تتسم بأثر سلبى على أعداد الشركات الخاصة الجديدة والسريعة النمو وأثر إيجابى على أعداد الشركات العامة السريعة النمو والموجودة أصلاً(٩).

ويعتقد بومول أن هناك أسبابًا تركيبية عميقة لكون الشركات الكبيرة لا تسعى وراء الابتكارات المحفوفة بالمخاطر، وبدلاً من ذلك تستثمر فى ابتكارات متدرجة لها احتمالات قابلة للتنبؤ، وإن كانت مطردة، لأرباح متزايدة. وتجنح الشركات الكبيرة إلى أن تنخرط فى أسواق كبيرة، عادة ما تكون عامرة بالمنافسة، وفيها يتعين على كل شركة أن تتلمس وسائل ابتكارية كى تحافظ على قاعدة زبائنها. كما يتعين على الشركات الكبيرة أيضًا أن تنفق أموالاً إضافية سعيًا وراء الإمساك بالزبون التالى، الذى بسبب المنافسة، عادة ما يكون أكثر تكلفة عن الزبون السابق. ويفضى هذا الصراع المستمر إلى مقولة «احتكار الأقلية المعوزة»، والتى تعنى أن الشركات الكبيرة قد تنعم بدخل هائل، ولكن عليها أن تنفق غالبية دخلها للمحافظة على نصيبها من السوق. ويقول بومول إن هذه المعركة لها نتائج قابلة للتنبؤ بها: "يؤكد تاريخ سباق التسلح أن المتوقع أن ينتهى الأمر بإفقار المشاركين"(١٠). وهناك دائمًا شركات يبدو أنها تفلت من ذلك الصراع وتجنى أرباحًا هائلة – الأمثلة الحية تشمل جوجل وأبل وإكسون، وهى شركات ناجحة فى أسواق مختلفة لأسباب مختلفة – ولكن الأغلبية الساحقة من الاستثمارات التجارية الكبيرة تعانى من نجاحات مادية أقل وصراع أشد عنفًا فى سبيل البقاء.

وإذا كانت حجج بومول صحيحة فى مجملها، وتقاسم العمل يميز تاريخيًا تركيبة الابتكارات التكنولوجية فى اقتصادنا، فليس ثمة من سبب يدعو إلى نشوء تركيبة

مغايرة فى مستقبل تطور التقنيات البيولوجية. ويضاف إلى ذلك أنه إذا كانت صناعات السيارات والفضاء تدل على المسار المستقبلى للتقنيات البيولوجية، فإن معنى ذلك أن الشركات الكبيرة الموجودة حاليًا لن تعيش إلا من خلال استمرار التحصل على الاختراعات والمنتجات الأولية من الشركات الصغيرة والمبتدئين.

ويطرح بومول فرضية مفادها أن "آليات السوق هى التى تحدد لكل نوع من أنواع الشركات وظيفته المميِّزة، وتوكل البحث عن الابتكارات الجذرية إلى الاستثمارات الصغيرة وتحيل ما ينتج عنها من تطوير إلى الشركات الكبيرة"[١١]. ومعنى ذلك أن تقسيم العمل فى الابتكارات هو سمة محفورة بعمق فى اقتصاد السوق. وإذا ما تطلعنا قُدُمًا إلى الدور المستقبلى للتقنيات البيولوجية بوصفها صناعة فى الاقتصاد، فنحن نتوقع أن تظهر نفس تقسيمة العمل بين الشركات الكبيرة والصغيرة. ولكى ينشأ هذا النظام الإيكولوجى (البيئى) للابتكارات تحتاج الشركات الصغيرة أن تكون لها حرية التوصل إلى الخدمات والمهارات والمواد الخام، كما يتطلب منها أن تصبح لها مقدرة عامة على المشاركة فى السوق. ونتيجة لذلك، إذا ما حدث أن الشركات الصغيرة وصغار المستثمرين العاملين فى التقنيات البيولوجية واجهوا قيودًا فى حرية استخدام البنية الأساسية والأسواق، فعلينا أن نتوقع ابتكارات أقل بصورة عامة.

وإذا ما أعدنا صياغة تلك الملاحظات، نجد أنه ليس من الواضح مطلقًا أن الصناعات المعتمدة على البيولوجيا سوف تتطور إلى قطاع من الاقتصاد الأعظم منظم بطريقة جذرية مختلفة عن أى قطاع آخر من قطاعات الاقتصاد. ويدل ذلك على أنه لكى نحقق الفوائد المرجوة من التقنيات البيولوجية، فعلينا ألا نكتفى بتحمل نظام بيئى مزدهر من المبتكرين من مقاسات مختلفة يشغلون أماكن مختلفة، وإنما علينا أن نشجعهم حق تشجيع. فإن كان هذا الادعاء صحيحًا فسنحس بأمان أكبر مع انتشار المهارات والمعارف.

وتحت مظلة القوانين المحتملة، يتعين على المطالبين بتحجيم حرية استخدام التقنيات الهندسية الأساسية والمهارات أن يفسروا كيف أن تلك القوانين سوف تؤخر

تكوين مناخ بيئى ابتكارى، وبهذا تعيق كل من أمننا المادى والاقتصادى. ولكى نحافظ على التقدم وفى نفس الوقت نحسن من أمننا، علينا أن نتفحص بكل دقة تأثير القوانين على القدرة على الابتكار.

تذكية(*) النار تحت القوانين.

فى يونيو ٢٠٠٦ نشرت جريدة «الجارديان» مقالتين أعلنت فيهما أن جيمس راندرسون المراسل العلمى للجريدة قد ابتاع «سلسلة قصيرة من دنا الجدرى» وأرسله بالبريد السريع إلى عنوان سكنى فى لندن[١٢]. ولكى يتجنب الوقوع تحت طائلة قانون الإرهاب البريطانى الصادر سنة ٢٠٠١، عمد راندرسون إلى إجراء تطفر فى السلسلة لصنع ثلاثة توقفات كودونية(**). بهدف ضمان الأمان. وعندما كشف مراسل عن هذه العملية المتكاملة، وجعل من تهديده لجموع الشعب موضوعًا للصفحة الأولى، علق فيل ويليس، عضو البرلمان ورئيس اللجنة البرلمانية للعلوم والتكنولوجيا، علق قائلاً كما هو متوقع: "هذه أكثر قصة إثارة للقلق سمعتها منذ زمن. ومن الواضح أن ثمة ثغرات هائلة تحتاج أن نتعامل معها بوضع قواعد أو قوانين"[١٣]. وفى معرض الحديث عن أخطار معلن عنها لمُمْرضات تخليقية، فإن التوقع بصدور قواعد تنظيمية لن يكون أمرًا مستغربًا كرد فعل لتكنولوجيا تخليق الجينات. ولعل القارئ العادى سيحس ببعض التعاطف والتأييد لرد فعل ويليس. غير أن القصة كانت أبسط بكثير مما ذكره المراسل.

(*) ذَكَّى النار زادها اشتعالاً. (المترجم).

(**) الكودون (codon) مجموعة من ثلاثة نيوكلوتيدات داخل تركيبة الدنا أو الرنا مسئولة عن تكوين بروتينات معينة. (المترجم).

ولكى نكون واضحين تمام الوضوح، نجد أن كل ما أثبته راندرسون هو استخدام الإنترنت وكروت الائتمان والبريد السريع. وهو لم يثبت أية مهارات لازمة *لاستخدام سلسلة* الدنا القصيرة ذات الاثنين وسبعين زوجًا من القواعد فى بناء بُنى أكبر حجمًا. وبهذا نجد أنه فى حين كان الإنذار الذى قدمه راندرسون مقصودًا به أن يثير نقاشًا جماهيريًا حول تقنية جديدة قوية، إلا أن الإرسال البريدى للدنا لم تكن له علاقة، ناهيك عن أى دور فى إثارة الدعاية.

لم تقدم الدعاية فائدة تُذكر للجمهور. وعلى غرار ما حدث من منتقدى نشر سلسلة فيروس إنفلونزا ١٩١٨، روج راندرسون للمقولة الكاذبة أن إنتاج مُمْرِضٍ حى ومعدٍ هو أمر يسير: "لكى يبنى إرهابى فيروسًا من الصفر فكل ما عليه أن يفعله ببساطة هو أن يأمر بإرسال أطوال متوالية من الدنا ثم يلصقهما معًا بالترتيب الصحيح"(١٤). ومثلما ذكرنا فى الفصل السابق، نجد أن حتى الخبراء لا يزالون يواجهون صعوبات عند محاولاتهم لصنع جينوم من أوليجونيوكلوتيدات قصيرة. وأقل ما يقال فى وصف ما قاله - بصيغة المضارع - أن "الإرهابى يستطيع ببساطة أن يُخلِّق مُمْرِضًا عن طريق تجميع جينومات، إنه قول مضلل».

بسبب تقريره واجه راندرسون انتقادات لاذعة من علماء ومهندسين سواء على أسس تقنية أو أخلاقية. وفى نقاش على الشبكة العنكبوتية فى موقع «نيتشر.كوم» أصر راندرسون على عدم الاعتذار وتمسك بأن مسألة حرية الوصول والاستخدام لتخليق الدنا غير المقننة تستحق الالتفات(١٥). وفى الحق، تلك منطقة حساسة للنقاش بين الممارسين وصناع السياسات والجمهور العام. غير أن تركيز راندرسون كان من زاوية ضيقة للغاية: "على (القواعد) أن توازن ... بين التقدم العلمى - الذى سوف يحمينا من الأفعال المفترضة للإرهابيين البيولوجيين - والحاجة لمنع استخدام التكنولوجيا فى أغراض شريرة". والسؤال الذى لم يجب عنه تقرير راندرسون - وهو السؤال الذى يأتى منطقيًا بعد التساؤل "من هو الذى يُسمح له بحرية استخدام تكنولوجيا تخليق

الدنا؟ – هو "هل محاولات تنظيم تلك الأنشطة سوف تؤدى حقًا إلى تحسين الأمن والأمان؟" ماذا لو كان ثمة سبب يدعو إلى الاعتقاد بأن تطبيق القوانين قد يفضى إلى إضعاف سبل الأمن والأمان والحط منها؟ ويتعين بحث هذه النتيجة المحتملة قبل الشروع فى تطبيق هذه السياسة.

أمثلة من القواعد والتوصيات الموجودة حالياً

قد يبدو جليًا أنه يتعين علينا أن نُجَرِّمَ تَمَلُّكَ مُمْرِضات أو سموم معينة، وأن علينا أن نمنع تخليق الجراثيم المسببة للأمراض. غير أن تحديد الأفعال التى يتوجب أن تُحظَر، وكيف يتم ذلك، دون أن نُحَجِّمَ البحث العلمى بدون قصد، ليس من الأمور البسيطة. والآتى بيانه هو استعراض قصير للسياسات وثيقة الصلة بهذا الأمر والتى وضعتها حكومة الولايات المتحدة.

إنشاء المجلس الاستشارى للأمن البيولوجى

من أجل تقييم أفضل ولوضع توصيات فى سبيل تحسين الأمن البيولوجى، أنشأت الحكومة الأمريكية «المجلس الاستشارى القومى العلمى للأمن البيولوجى» (NSABB). ويتكون من ممثلين عن إدارات ووكالات حكومية مختلفة وخبراء غير حكوميين، ويتضمن ميثاقه الرسمى "تقديم النصيحة والتوجيه والقيادة الخاصة بالإشراف على ما يتعلق بالأمن البيولوجى على الأبحاث البيولوجية ذات الاستخدام المزدوج، والتى تُعَرَّف بأنها البحوث البيولوجية ذات الأهداف العلمية القانونية والتى قد يُساء استخدامها مشكلة خطرًا بيولوجيًا على الصحة العامة أو الأمن القومى". وتقتصر اختصاصات هذا المجلس على كل الأبحاث "التى تقوم بها أو تدعمها

الفدراليات، وكذلك مراجعة أبحاث معينة ومحتملة النشر من تلك التى تنفق عليها الحكومة فى المعاهد الأكاديمية والشركات الخاصة. ونلاحظ أن ميثاق هذا المجلس لا يتضمن فرض سلطانه على الأبحاث الممولة من القطاع الخاص[١٦].

السجل القومى للوكلاء المنتقين

كما أصدرت حكومة الولايات المتحدة تشريعات أكثر صراحة لترسيخ إجراءات الأمان البيولوجى. وقانون «أمن الصحة العامة وجهوزية الاستجابة للإرهاب البيولوجى»، "يتطلب من جميع الأشخاص الذين يمتلكون عناصر بيولوجية أو سمومًا يُعتقد أنها تشكل تهديدات للصحة العامة أن يبلغوا سكرتير إدارة الصحة والخدمات البشرية"[١٧]. وفرض القانون أيضًا عقوبات لمن يتخلفون عن إبلاغ السلطات المختصة بحيازتهم لمواد معينة. والخلاصة، أن «السجل القومى للوكلاء المنتقين» والتشريعات التى سُنت لإنشائه هى محاولة لتعقب حيازة جراثيم معينة وجزيئات يُعتقد أنها تشكل تهديداً للصحة العامة والاقتصاد.

حظر تخليق فيروس الجدرى

بالإضافة إلى حظر تملك ونقل المواد الخام، وهى أمر يمكن ببساطة تفسيره قانونياً، قامت الحكومة الأمريكية بالفعل بمحاولة لتحجيم استخدام تكنولوجيا التخليق فى إنتاج مُمْرِضٍ معين. وتم إدخال تعديل على قانون إصلاح المخابرات ومنع الإرهاب لسنة ٢٠٠٤، وأُدخِل هذا التعديل فى آخر لحظة وينص على "فرض عقوبات مشددة على محاولات هندسة أو تخليق فيروس الجدرى. ويُعَرِّف التعديل فيروس الجدرى بأنه أى فيروس يحوى أكثر من ٨٥ بالمائة من سلسلة جينات فيروس «فاريولا ميجور» أو «فاريولا مينور»"[١٨]. ومر التعديل ولم ينتبه إليه أحد لعدة شهور[١٩]. وحتى بعد أن ذاع

أمره وصار مجالاً لنقاش واسع، "لم يستطع الفيرولوجيون الذين تفحصوا فى دقائق تفاصيل القانون، أن يتفقوا على ما الشىء الذى يجرمه التعديل بالضبط"[20]. فقد وجدوا أن التعريف الموسع للتشابه مع الجدرى يشكل مشكلة بصفة خاصة لأن "العديد من فيروسات «بوكسى»، (poxyviruses)، ومنها سلالة لقاح تسمى «فاكسينيا» بها جينومات مطابقة لجينومات الفاريولا ميجور بنسبة أكبر من ٨٥ بالمائة"[21].

وقد فحص المجلس الاستشارى القومى للأمن البيولوجى، باعتباره جزءًا من واجباته، التعديل المشار إليه وقرر بشأنه مسلكًا مغايرًا: "إن التعريف الحالى لفيروس الفاريولا، كما ورد فى القانون، يمكن تفسيره بحيث يشمل أنواعًا أخرى من فيروسات «بوكسى» موجودة طبيعيًا وأقل إضرارًا مثل فيروس الفاكسينيا، وهى فيروسات أساسية فى الأبحاث النافعة، وبالتالى فإن ذلك يعنى الحظر والتجريم غير المقصود لأنواع نافعة فى البحث مثل تطوير وإنتاج لقاح ضد الجدرى. ولهذه الأسباب، يوصى المجلس الاستشارى القومى للأمن البيولوجى بإلغاء التعديل، وبخاصة لأن إساءة استخدام فيروس الفاريولا تغطيها بكفاءة قوانين جنائية أخرى موجودة بالفعل"[22]. وبهذا أوصت المجموعة الاستشارية الأولية التى شكلتها حكومة الولايات المتحدة بهدف توجيه الجهود الفدرالية للأمن البيولوجى، أوصت بإلغاء أول قانون يقيد استخدام تخليقات الدنا، وهو بداية لافتة للنظر لفرع جديد تمام الجدة فى السياسات التكنولوجية.

وينظر الكثيرون إلى أن القدرة على تخليق مُمْرِضٍ من الصفر تعتبر تهديداً يستوجب حظراً قانونيًا. غير أن الجمع بين مرونة تقنيات تخليق الدنا مع تعقيدات تحديد الطبيعة الدقيقة للتهديد، يجعل من سن تشريعات واضحة ولا لبس فيها بهدف الحظر القانونى أمراً بالغ الصعوبة. والتقنيات الجديدة تجبر صانعى السياسات والعلماء على حد سواء على إعادة تقييم ما هو ممكن عمله فى المعامل، وما الذى يمكن

اعتباره تهديداً، وكيفية التعامل مع تلك التهديدات. بل لعل السنوات القادمة تخبئ بين طياتها بزوغ موضوعات أكثر تعقيداً.

التشريعات المنتظرة والموصى بها

ليس من المحتمل أن تؤدى التشريعات التقييدية وفرض قيود على تدفق المعلومات إلى تقليص خطورة استخدام التقدم فى علوم الحياة فى أغراض شريرة مستقبلاً. وفى الحق، أنها سوف تُصَعِّب من مهمة المجتمع المدنى فى الدفاع عن نفسه ضد تلك التهديدات، وفى نهاية المطاف من المحتمل أنها ستؤدى إلى إضعاف الأمن القومى والبشرى. ومثل تلك القوانين والقيود من شأنها أن تُحَجِّمَ الاحتمالات الهائلة لاستمرار التقدم فى علوم الحياة والتقنيات المتعلقة بها لتحسين الصحة، وتهيئ مصادر للطعام والطاقة، وتسهم فى التطور الاقتصادى سواء فى المناطق من العالم فقيرة الموارد أو غنيتها، وتعزز من النوعية الإجمالية للحياة البشرية(٢٣).

هذا ما يقرره تقرير من الأكاديمية القومية للعلوم، كتبته لجنة التقدم التكنولوجى ومنع استخداماتها فى الجيل القادم من التهديدات البيولوجية، وهى لجنة مشاركة بين المعاهد القومية للطب والمجلس القومى للبحوث(٢٤).

وفى نهاية عام ٢٠٠٦ أذاع «المجلس الاستشارى القومى للأمن البيولوجى» تقريره المبدئى عن التهديدات التخليقية. ومن بين التوصيات التى أوصى بها هذا المجلس تلك المتعلقة بما يلى (١) تعريف محدد للسلسلات التى يعنيها «السجل القومى للوكلاء المنتقين»، (٢) إجراءً رسمىٌ متناسقٌ للمقارنة بين طلبات التخليق مع السجل باستخدام برمجيات، (٣) الاحتفاظ بسجلات الطلبات لخمس سنوات. وذكر المجلس أن الامتثال الفاعل يتطلب موافقة الجهة المزوِّدة، وقد يحتاج أيضًا إلى مراجعات وفرض غرامات وأية إجراءات قانونية أخرى"(٢٥).

تقرير سلون

يلاحظ «المجلس الاستشارى القومى للأمن البيولوجى» أن "سرعة التقدم فى تقنيات (تخليق الجينات) تحتاج خيارات حكومية قادرة على مواكبة سرعة علم سريع التطور". وهذا هو الاهتمام الأول لتقرير أذيع فى خريف ٢٠٠٧ بعنوان «الجينومات التخليقية، خيارات أمام الحكومة» ومولته مؤسسة ألفريد سلون (ومن ثم يشار إليه باسم «تقرير سلون» أو «التقرير»): "كان هدف المشروع تحديد السياسة الخاصة بالجينومات التخليقية وتحليل السياسات والوسائل التقنية وغيرها من الوسائل للإقلال من مصادر القلق على السلامة دون أن تؤثر سلبًا على احتمالات تحقيق المنفعة التى يبدو أنها قادرة على تحقيقها". كما ذكر مؤلفو التقرير أنهم: "لم يتوصلوا إلى رصاصة سحرية لتأكيد أن الجينومات التخليقية لن تُستَخدَم إلا فى تطبيقات إيجابية بناءة. غير أننا وضعنا سلسلة من السياسات التدخلية التى تعزز تقليص الأخطار من تلك التقنية البازغة، ويمكن، باستخدامها كحافظة تناسقية، أن تخفض من التهديدات بصورة مؤثرة"[٢٦]. وحدد التقرير ثلاث مناطق رئيسية لسياسة التدخل: (١) الشركات التجارية التى تبيع الدنا (الأوليجونيوكلوتيدات والجينات أو الجينومات)، إلى مستخدمين لهذه السلع؛ (٢) أصحاب تجهيزات معامل تخليق الدنا فوق المنضدة، التى بواسطتها يستطيع المستخدمون تصنيع دنا خاص بهم؛ (٣) مستخدمو الدنا التخليقى أنفسهم والمعاهد التى تؤازرهم وتشرف على عملهم[٢٧].

تطوير توصيات السياسات بعد تقرير سلون

الآتى بيانه هو فحص مختصر لجانبين من جوانب تقرير سلون يحتاجان مزيدًا من التمحيص: (١) إن مجال الاختيارات المتاحة أمام الحكومة يتسم بالضيق الشديد، (٢) فرضية وجود «مستخدمين مشروعين» فى ظل غياب تعريف «للشرعية».

ويتعين فى المناقشات المستقبلية توسيع نطاق الاختيارات بحيث تشمل السياسات الحالية الأساسية. وتفتقد الخيارات التى وردت فى التقرير إلى خيارى «لا تفعل شيئًا» أو حتى «حافظ على الأوضاع الحالية»، التى هى بالفعل لا تعنى شيئًا بسبب وجود «السجل القومى للوكلاء المنتقين». والاختيار الوحيد الموجود يشكل نوعًا من القواعد الجديدة. ويتضاعف هذا العيب فى الجزء من النص الذى يلى مباشرة قائمة الاختيارات، الذى ينص على: "هذا التقرير لا يقدم توصيات". غير أن المحافظة على الأوضاع الحالية لا يدخل ضمن الخيارات المتاحة للمستقبل.

وبهذا يكون نص التقرير عبارة عن جدل بأن التدخل مطلوب لتحسين الأمن والسلامة. وباقتصار التقرير على ذكر الاختيارات التى تذهب لما هو أبعد من قواعد اليوم الأساسية، فإن كاتبى التقرير يؤكدون بكل وضوح الحاجة إلى المزيد من القواعد التنظيمية. ومن خلال فرضية الحاجة إلى قواعد، ومن خلال التحديد الصريح لمجموعة 'المستخدمين المشروعين'، والتى لم يتحدد فيها ماهية المشروعية، فإن التقرير فى حقيقة أمره يوصى بتحجيم حرية التوصل إلى المعلومات واستخدامها.

التأثيرات المحتملة غير المقصودة لتنظيم تخليق الدنا

يتعين أن يبقى تطبيق قيودٍ على التكنولوجيات البيولوجية من بين خياراتنا. ولكن تطبيق القوانين دون تفحص دقيق للنتائج المحتملة هو أمر بعيد عن الحكمة.

وسوف يترتب على القيام بإجراءات للأمن والأمان والمحافظة على سجلات قابلة للمراجعة سواء للأمن أو لحرية الوصول والاستخدام، سوف يترتب على ذلك تحمل المنتجين والمستخدمين والحكومات والمجتمع بأسره لنفقات ذلك. وأول ما يحتاجه استيعاب التكلفة المحتملة لتحجيم حرية الوصول إلى المعلومات هو فحص الآليات المقترحة للقوانين بشىء من التعمق.

وأحيانًا يدور الحديث المتعلق بتنظيمات خاصة بتخليق الدنا حول مجموعة من «المستخدمين المشروعين». ولسوء الحظ، لا يبدو واضحًا مطلقًا أن القوانين سوف تُحَجِّمُ من حرية الوصول إلى تقنيات التخليق بواسطة مستخدمين يمكن اعتبارهم يشكلون تهديدًا. وقد يدفع تحجيم حرية الوصول إلى تخليق الدنا بعض المستهلكين - بمن فيهم أولئك الذين يستحقون أن يُفحَصوا فحصًا دقيقًا - لكي يبحثوا عن وسيلة للوصول إلى المنتجين الذين إما أنهم غير ملتزمين بالقيود أو يرغبون فى تجاهلها.

وفى سبيل تسهيل عملية السيطرة على حرية الحصول على المعلومات يقترح تقرير سلون إنشاء سجل للعاملين فى تخليق الدنا وموردى الخدمات والمستخدمين المعتمدين. وسوف تتيح تلك الإجراءات عدم تخليق الدنا إلا عند المؤسسات المُؤَمَّنَة حيث تتحدد إما من خلال ملكية مرخص بها للأجهزة أو منح تراخيص للمستخدمين المشروعين أو كلا الإجراءين. وتبقى السلَسلات المتاحة لتلك المؤسسات المُؤَمَّنَة فى السجلات لعدد من السنوات لتسهيل جهود الطب الشرعي. وسوف تستخدم البرمجيات الماسحة الكاشفة فى فحص السلَسلات المقدمة لتحديد الأخطار المحتملة على صورة جينات ومسارات تُكَوِّدُ لسموم أو جينومات تكود لجراثيم مُمْرِضة.

وفيما يتعلق بتكاليف هذا السجل، يذكر تقرير سلون "إذا كانت آليات المراجعة مرهقة فقد تعمد الشركات الصغيرة الناشئة إلى التحول بدلاً من ذلك إلى التخليق المنزلى للدنا"[٢٨]. وبهذا قد تصبح إحدى النتائج الاجتماعية المباشرة لتطبيق السجل هو أن بعضًا من المستخدمين المشروعين قد يؤثرون عدم المشاركة بسبب التكاليف المادية للامتثال للسجل وبذلك يقلصون من فوائده. أما أولئك الذين يفضلون «الخروج على النظام المألوف» بممارسة التخليق المنزلى للجينات فلن يمكن مراقبتهم إلا إذا كانت ثمة مراقبة لصيقة للكواشف (reagents) والأجهزة. وكنتيجة لذلك، فإن حصيلة محتملة واحدة لتحجيم حرية الوصول إلى التخليق قد تعكس المعضلة التى واجهتها «الوكالة الأمريكية لتطبيق قوانين الأدوية» عندما أنزلت ضربة قوية للإنتاج المحلى للميثامفيتامين (انظر الفصل التاسع) وهى أن الحصول على معلومات حول الأنشطة التى تريد

الوكالة أن تراقبها وتكبحها قد صار أمراً بالغ الصعوبة. وبالمثل، فإن الإجراءات التنظيمية التى تدفع بالمستخدمين إلى ممارسة التخليق خارج السجل قد تؤدى إلى تقليص المعلومات عما يجرى تخليقه، وعمن يقومون بذلك.

وفى هذا الإطار يتوجب علينا أن نضع فى اعتبارنا الطبيعة الدولية المتأصلة فى سوق تخليق الدنا. ولهذا يتعين إذن أن يكون التنظيم الفاعل لحرية الولوج إلى التخليق عالمياً فى مجاله، ويجب أن يتعقب تدفق المعلومات الثمينة للتصميم من خلال شبكات إلكترونية، أحياناً تكون عبر الحدود. وتصل بنا هذه النقطة إلى أهم نقطة ضعف فى التفتيش والمسح الخاص بتخليق الدنا، وهى أمر متأصل فى الاعتماد الحتمى والمتزايد على تكنولوجيا المعلومات. وهذه المعلومات يمكن الاطلاع عليها ونسخها بل وتغييرها، سواء على صورة توقيع إلكترونى أو قاعدة بيانات «للمستخدمين المشروعين»، أو برمجيات ماسحة، أو أداة للتصميم. ويضاف إلى ذلك أنها موضع عددٍ متنامٍ من تهديدات الأمن والسلامة تغطى مجالات تتراوح بين أخطاء بشرية بسيطة إلى الاحتيال واعتراض المعلومات أثناء نقلها، وحتى هجمات من برمجيات معقدة على غيرها من البرمجيات المعقدة.

وتحت مظلة أية تنظيمات دولية تتطلب مسحاً، ستواجه المؤسسات الفردية بمطالبتها بالكشف عن تصميماتها لمجموعات متعددة من الأعين الفاحصة، مما قد يهدد أمنها الاقتصادى. وبدءاً من عام ٢٠٠٦، يقدر أن التجسس الصناعى يكلف المؤسسات ٢٠٠ بليون دولار سنوياً [٢٩]، على الأقل. وتأتى الأخطار التجارية من جراء كشف التصميمات المملوكة فى صورتين.

أولاهما، أنه من المستحيل أن تضمن لأية مؤسسة تجارية أن ملف التصميم، وبخاصة إذا خُزِّن إلكترونياً لفترة طويلة، سيكون آمناً من أعين المتلصصين أو الأيدى المتطفلة. وثانيهما، أن اعتراض سَلْسَلات الدنا المرسلة بالسفن من موردين معتمدين سوف تتيح قراءة ذلك الدنا بواسطة أجهزة السَلْسَلة. واليوم، نجد أن سَلْسَلة الدارات (الدوائر) الجينية ذات الأهمية الاقتصادية – وكلها أقصر بكثير من جينوم كامل – لا

تحتاج من مؤسسة حسنة التجهيز بأجهزة سَلسَلة إلا إلى جهد بضعة أيام، وربما لا أكثر من عدة ساعات (انظر الفصل السادس).

وفى كلتا الحالتين، لن يكون من الصعب أن نهندس عكسيًا دارة تخليقية متواضعة الحجم من بيانات سَلسَلة حتى نتوصل إلى وظيفتها. وهو قول صحيح اليوم لأن غالبية الجينات (أو أشكال مختلفة منها) التى قد تدخل فى تصميم جديد إما مودعة بالفعل فى قاعدة بيانات عامة أو على صلة وثيقة بقواعد البيانات تلك. وفى الوقت الحالى، نجد أنه من غير المحتمل وجود بيانات جينية أو أيضية سرية كافية لأن تعمل كحاجز صد ضد الهندسة العكسية للدارات الجينية. ولا تحتاج إعادة تخليق ومن ثم استخدام السَلسَلات المعتَرَضُ طريقها إلا إلى خطوة إضافية ضئيلة (وإن كانت لا تزال باهظة التكاليف فى الآونة الراهنة).

وعلى مدى السنوات القادمة، لا يحتاج المؤيدون ولا المعارضون الذين ورد ذكرهم فى الفقرات السابقة (وكما يحددهم القارئ) أن يستخدموا نفس البرمجيات وأدوات التصميم، ولا نفس قاعدة البيانات الخاصة بالقطع. ويتطلب الاعتماد على البرمجيات والنماذج فى أغراض الأمن والسلامة أن تكون تلك الأدوات دائمًا الأفضل، وأن تكون قواعد البيانات دائمًا كاملة. ولكن الضغوط التنافسية المستمرة سوف تكون موجودة على الدوام من أجل تحسين التصميمات وأدوات المسح، فى إطار احتمالات أن تكون الابتكارية متاحة فى أى مكان فى العالم. والأمر ليس مجرد مباراة يمكن الفوز بها برسم أية خطوط فى الرمال الإلكترونية.

وسباق التسلح هذا هو إشارة صريحة لاحتياجات الأمن والسلامة فى المستقبل إلى أدوات تصميم تنبؤية، تكون فى نفس الوقت مزدوجة الاستخدام. ويمكن عندئذ استخدامها فى التجسس سواء كان صناعيًا أم غير ذلك، مما سوف يجبر المصممين على التشويش على تصاميمهم أو البحث عن موردين للتخليق غير ملتزمين بتلك الإجراءات، مما يزيد من تعقيدات المهمة المعقدة أصلاً، وهى التأكد من أن المستخدمين المشروعين فقط هم من لهم حرية الوصول إلى التكنولوجيا. ويمكن استخدام نموذج

يستطيع التنبؤ بالآليات الجينية بهدف التعرف على التهديدات المحتملة بناءً على معلومات السلسلة وحدها، وهذا النموذج يمكن، من حيث المبدأ، استخدامه فى خلق تلك التهديدات. ونستطيع أن نقرر بصورة أكثر مباشرةً وفى ضوء الانتشار العالمى للتكنولوجيات البيولوجية، أن صراعًا دائمًا سوف ينشب لإنتاج أدوات تستطيع اكتشاف الأخطار، وهو صراع لا تؤدى فيه هذه الأدوات وظيفتها بكفاءة إلا لأنها تتيح تخليق تهديدات مماثلة إن لم تكن أكثر تعقيداً.

الصدام بين الابتكار والقواعد

إن قلقى الأعظم ينصب على أننا الآن لا نملك القدرات التكنولوجية للتعامل مع تهديدات سريعة الظهور سواء كانت طبيعية أو اصطناعية، وأن تطوير مثل تلك التكنولوجيا يحتاج إلى ابتكارات أكبر بكثير مما عهدناه فى البيولوجيا حتى الآن. ولقد كانت الدوافع على الابتكار السريع فى الطيران وعلوم الحاسب الآلى فى القرن العشرين هى (١) الاستثمارات الحكومية لدعم تطوير الهندسة الأساسية وتقنيات الإنتاج و(٢) أعداد كثيفة من المبتكرين التجاريين من أحجام مختلفة الذين يبتكرون وينتجون الأدوات التى نستخدمها بالفعل. فإن أردنا أن نشجع انتشار الابتكار اللازم لإنتاج التكنولوجيا التجارية الحقيقية - بمعنى الأشياء التى يستطيع الأفراد أو الحكومة أن تشتريها وتعتمد عليها - فإن علينا أن نقيم أنظمتنا للأمن والسلامة بحيث تشجع، لا أن تثبط، المبتكرين التجاريين على الاستثمار والمخاطرة برأس المال والسمعة.

فإذا ما أُتيح لمصممى دارات الدنا الجديدة الاختيار - أو إذا ما أجبرتهم الإجراءات التنظيمية على الاختيار - فإن البعض منهم ربما يمارس التعامل مع موردين للتخليق لا يحتفظون بسجلات للملفات التصاميم. وإذا حدث أن تنظيمات تحتم الاحتفاظ بسجلات قد وُضعت موضع التنفيذ، فلكى تكون فاعلة، فإن التشريعات وثيقة

الصلة بها لابد أيضًا أن تنص على منع المصممين المحليين من التعاقد مع موردى التخليق فى بلدان ليس لديها ترتيبات مماثلة للاحتفاظ بسجلات. وفى حين قد يتم تمرير مثل تلك التشريعات وتنسيق العمل بها دوليًا مع الحصول على إجماع منظمة التجارة العالمية (رغم أن ذلك قد يتم الحكم عليه فى القضاء فى نهاية المطاف)، فإن تنفيذ ذلك سيكون أمرًا بالغ الصعوبة ومليئًا بالتحديات.

سوف يواجَه المصممون باختيارات صعبة. فسوف يُطلب منهم أن يتخلوا عن سجل المخزون لدى موردى التخليق، مما قد ينتج عنه فقدان العمل والملكية الفكرية. أو أنهم يخاطرون بحقيقة أن بلازميدات مهربة بالطرق الدولية - ربما بالبريد - قد تعترضها السلطات، رغم أن ذلك احتمال بعيد، مما يترتب عليه اتخاذ إجراءات قانونية سوف تنتهى لا محالة بفقدان العمل والملكية الفكرية.

وفى ظل هذا الموقف، يشكل الطريق القانونى أخطارًا أشد جسامة من الطريق غير القانونى من ناحية تأثر الملكية الفكرية. وببساطة، ليس واضحًا كيف سيتسنى لمنهجية التنفيذ أن تكشف عن الدنا الذى يتم تهريبه. والحال اليوم، أن دنًا غير مؤذٍ أحيانًا ما يتم نقله أو إرساله بالبريد بين مجموعات بحثية فى صورة مجففة على قطع من الورق. والأمر الجوهرى ليس هو أن أعدادًا كبيرة من مصممى الدنا أو مستخدميه مستعدون للمخاطرة بالذهاب إلى السجن كى يتجنبوا فقدان الملكية الفكرية، ولكن أن أى شخص يريد الحصول على الدنا من مصدر خارج البلاد يستطيع ذلك من خلال طرق متعددة، مع حرية تكاد تكون غير محدودة لابتكار وتطوير طرق جديدة للالتفاف حول أى حظر.

إن بناء حاجز مؤثر ضد التنقل المادى للدنا التخليقى سوف يكون أمرًا باهظ التكاليف بصورة استثنائية. وهذا الأمر لا يعدو كونه دلالة إضافية على أن تنظيم استخدام تخليق الدنا وحرية الوصول إليه قد لا يكون أنجع وسيلة لتحسين الأمن والسلامة. وبدون تقييم واضح للتأثيرات التجارية للإجراءات التنظيمية، وتوابع الغش الذى يوحى به السوق، فإن تنفيذ التنظيمات يكون معضلة على أقل تقدير.

ويعكس الاندفاع تجاه التنظيم الجدلَ الشعبي حتى الآن. وتجنح التوصيات الأكاديمية والحكومية الخاصة بالسياسات إلى أن تنشأ دون النظر إلى اعتبارات واقعية عن الكيفية التي تنشأ بها التقنيات الجديدة واستخداماتها. وثمة نقاش غير مكتمل حول السوق الذي تمارس فيه شركات التخليق عملها، وكيف يتغير هذا السوق مع ازدياد الطلب، وكذلك عن أهم أمر وهو سلوكيات مستهلكي الدنا التخليقي تحت مظلة الخطط التنظيمية المختلفة. ويزودنا التزامن بين انتشار الميثامفيتامين ومركزيته بمثال متناقض واضح المعالم أيما وضوح للتأكيد على أن الأمن والسلامة يمكن تحقيقهما بتطبيق القوانين على تكنولوجيا واسعة الانتشار بالفعل.

والصلة الوثيقة بين هذه الملاحظة وبناء اقتصاد بيولوجي متين لهما شقان. أولها أن الميثامفيتامين هو منتج مُصنَّع، وانتهت كل محاولات وضع قيود على تصنيعه بقدرات إنتاجية أكبر وبتفاقم غموض السوق. ومثلما هي الحال في كل أعمال الشرطة والمخابرات، تشكل المعلومات المفتاح لتنفيذ ناجح للأحكام أو في الأمن القومي، على التوالي. ولهذا، ومع وضع مستقبل الاقتصاد البيولوجي نصب أعيننا، نجد أن الوصول بتدفق المعلومات إلى السلطات إلى حدها الأقصى، هو أمر جوهري للأمن والسلامة، وربما حتى لو كان على حساب السماح بحرية الوصول إلى التكنولوجيا والمهارات بواسطة أفراد مثيرين للقلق عند نفس تلك السلطات.

وثانيها، أن التركيز في القوانين على الموردين وليس على المشترين لا يغير شيئًا في طلبات الشراء وإنما ينقل الإنتاج إلى أماكن أخرى ويشجع على الاستبدال. وهذه المشكلة، من منظور الأمن والسلامة، تتفاقم وتزداد حدةً عندما تكون قيمة السلعة أكبر من طاقة المشتري، مثلما هي الحال في أسواق الجينات المخلقة. وبمعنى آخر، ثمة طلب واضح ومتزايد على الجينات المخلقة ليس لسبب خاص بها، وإنما لأهميتها في إنتاج مواد ووقود لها قيمة أكبر، سواء اقتصادية أو غيرها. وبهذا، فإن وجود أي عنق زجاجة، سواء كان اقتصاديًا أم تقنيًا أو تنظيميًا، في طريق تحويل مواصفات إلكترونية خاصة بالسَلسلَة إلى دنا مادي سوف يسهل ببساطة دور المُوَرِّدِ

البديل فى سوق هو دولى أصلاً. وتتطور هذه الآلية فى أسواق الجينات المخلقة بأسرع مما هو متوقع(٣٠).

وكمثال نضربه، نجد أن كثيراً من شركات التخليق الصغيرة توجه العديد من الطلبات إلى الشركات المصنعة. غير أن التركيبة الموجودة لسوق ملكية تخليق الجينات هى محل عدم رضاء بالفعل بين المستهلكين. وفى ضوء العديد من المحادثات غير الرسمية، يبدو واضحاً لى بالفعل أن الجهات المعنية ببناء دارات جينية تخليقية أو كائنات تخليقية غير مرتاحة لكشف التصاميم المملوكة فكرياً للفحص بواسطة أى منافس محتمل أو أى طرف ثالث لديه تعارض محتمل للمصالح. ويشمل ذلك كل شركات تخليق الجينات التى تهدف، باعتبارها جزءاً من إستراتيجيتها، إلى تقديم خدمات تصميمية مترتبة على أعمال التخليق. ويضاف إلى ذلك، أنه فى حين يتم تسليم السلَسلات ذات الأطوال متعددة الجينات فى خلال أسبوعين أو ثلاثة، إلا أن هذا التأخير قد أصبح بالفعل خطوة تُحَجِّمُ دارات التصميم فى شركات البيولوجيا التخليقية. ومعنى ذلك أن السعى إلى إعادة سلعة قابلة للتسويق إلى السوق، يتسبب زمن تسليم الدنا المُصَنَّع والمستمد من مصادر خارجية فى الإبطاء من مسيرة هذا السعى، مما يستدعى فى نفس الوقت تعريض أعمال التصميمات المملوكة فكرياً وإستراتيجياتها إلى مراقبين خارجيين.

وهذا التأثير هو فى أقل تقدير هدف مستتر لبعض الناس الذى يعتبرون مركزية تخليق الجينات ميزة للأمن والسلامة. ويتردد القول بأن المصانع المركزية ذات التكلفة المنخفضة وحجم الإنتاج الكبير تتيح فحصاً أكثر تأثيراً لطلبات السلَسلَة المثيرة للقلق. إن الخيار الأرخص تكلفةً والأقل تدخلاً، والذى حدده تقرير «الجينومات التخليقية، خيارات أمام الحكومة» هو أن تحتفظ شركات التخليق بسجلات للطلبات لخمس سنوات(٣١). غير أن اجتماع قضايا الملكية الفكرية وانعدام الكفاءة الناشئ من طول زمن التسليم سوف يخلق بلا ريب سوقاً للتكنولوجيات البديلة للتخليق. ونتيجة لذلك أظن أن سوقاً لأجهزة منضدية لتخليق الجينات سوف تنشأ سريعاً، إن لم تكن قد

نشأت بالفعل، حتى مقابل مقدم مالى باهظ[٣٢]. وسوف تقضى هذه الأجهزة على المخاوف المتعلقة بالملكية الفكرية كما أنها من الممكن أن تخفض تخفيضًا كبيرًا من التكاليف (تكاليف العمالة فى المقام الأول) لأن الجينات سوف تُنتَجُ داخليًا فى أيام بدلاً من أسابيع.

إلى أين نتوجه من هنا؟

يحمل لنا كل شهر وكل مسابقة «آى جِم» أنباءً جديدة عن أنظمة تخليقية مدهشة فى تعقيداتها – أنظمة تكاد تعمل وفق ما تقرر لها. ولكن كلمة «تكاد» هى لب الهموم حول المستقبل. فما زالت سلوكيات السواد الأعظم من الأنظمة البيولوجية من العسير التنبؤ بها، وهى أوضاع من المحتمل أن تدوم طويلاً وسواء كان الأمر يتعلق بلقاحات تخليقية أو محاصيل زراعية مهندسة جينيًا أو مشاريع صيفية بسيطة أو أنظمة مكونة من مكونات لم يتم تحديد مواصفاتها ولا تفاعلاتها تحديدًا حسنًا، فإنها جميعها تصدر عنها سلوكيات غير متوقعة.

ومن الأمور الجوهرية للتطور المستقبلى للتكنولوجيات المستخدمة فى تعديل البيولوجيا أن يعترف واضعو السياسات والممارسون والمنتجون والمستهلكون اعترافًا واضحًا لا لبس فيه بأن البيولوجيا نفسها هى تكنولوجيا. وعلى هذا النحو، تتطلب التكنولوجيا البيولوجية من عملية اتخاذ القرار أن تكون مبنية على أفضل البيانات المتاحة لتقييم الحكمة من تطبيقات معينة. واليوم ما من جسر يُبنى فى الاقتصادات المتطورة ولا طائرة ولا سيارة ولا حاسب آلى دون تقييم لعوامل الفشل والنتائج المترتبة على ذلك. وإذا ما تجوهلت عوامل الخطورة أو أُغفِلت فقد ينتهى الأمر ببناء جسر ينهار، أو سيارات تنقلب أو تنفجر عند الاصطدام، أو نبات قطنٍ مهندس جينيًا تسقط سيقانه على الأرض لأسباب غامضة، وعلاجات جينية تسبب الأمراض بدلاً من أن تعالجها.

ومن اليسير مراقبة معايير تصميم وبناء البنية التحتية الكبيرة المرئية، لأن من الصعب أن تمارس أى شىء على شاكلة الهندسة المدنية متنكراً. وبالمثل، عندما تقصف السيارات والطائرات أرواحًا فإنه من السهل نسبيًا أن تكتشف إشارات التحذير، والمسئولون عن ذلك يصيرون عرضة للمساءلة وفقًا للأنظمة القضائية المحلية.

وفى تقييم نتائج اتخاذ قرارات خاطئة وسن تشريعات لتحسين الأمن والسلامة، يتعين علينا أن نفرق بين الإهمال والعثرات التكنولوجية. وثمة فارق كبير بين سقوط طائرة نتيجة خطأ وقع فيه نظام مراقبة حركة الطيران وبين خطأ ميكانيكى لقطعة معيبة أو لم تنل الصيانة الواجبة، وسقوطٌ نتيجة لظاهرة لم تكن أهميتها مفهومة من قبل أثناء الهندسة مثل إجهاد المعادن أو تأثيرات الرياح. وربما يكون هناك فقدان للأرواح فى جميع تلك الحالات، ولكن التفرقة بين الإهمال الشخصى والجهل الجماعى هو من أساسيات أنظمة العدالة الجنائية والمدنية والقوانين والقواعد الإدارية الموجودة. وليس واضحًا على الإطلاق إن كانت ثمة حاجة للمزيد من التنظيمات فى حالة التكنولوجيات البيولوجية أو أنها ستوفر مزيداً من الأمن والسلامة.

وبصورة عامة، هناك نوعان من القيود على التصرفات فى مجتمعنا. وأول نوع، وهو يلعب دوره قبل أى تصرف يتم، ويتكون من قيود على ممارسة بعض المهارات، ويأتى على صورة قوانين تسنها الدولة أو تصاريح مِهنية. ويأتى النوع الثانى على صورة معالجة إذا ترتبت على الفعل أضرار مادية أو اقتصادية أو اجتماعية. ومن غير المحتمل أن يبادر أى شخص يهتم بتلك القضايا أو هو ضالع فى جدل وثيق الصلة بها، بأن يعترض على عقوبات قانونية ضد أولئك المسئولين عن استخدام تقنيات بيولوجية تسبب أضراراً. غير أنه نوع من القواعد المنظمة مختلف تمام الاختلاف، عندما ترغب فى تقييد حرية الوصول إلى التقنيات البيولوجية أو تجرم استخدامها، عن أن تفرض عقابًا على من تسبب فى أضرار لممتلكات أو لشخص نتيجة الإهمال أو استخدام شرير متعمد لتلك التقنيات. وليس واضحًا من الذى سيقع تحت طائلة التشريعات أو تُطلب منه تصاريح مِهنية.

ومن الجائز أن تنشأ أوضاعٌ فى المستقبل للمهندسين أو الحرفيين الذين يقومون بتصميم أنظمة بيولوجية تخليقية لأغراض تطبيقات الرعاية الصحية أو اللقاحات أو حتى لزرع المنازل وتنميتها يومًا من الأيام، أوضاعٌ تتطلب منهم أن 'يوقعوا على رسوماتهم' بوصفهم مهنيين. غير أن ذلك يطرح سؤالاً عن موقف الهواة و'اصنعها-بنفسك'. وفى حين حتى الذين يقومون بتعديلات فى منازلهم بأنفسهم يحتاجون تصريحًا بذلك، هناك دائمًا أماكن لا وجود فيها لتلك التصاريح أو لا تُطبق أو غير مُلزِمة بالتطبيق. والدرس المستفاد هو أنه عندما تكون حرية الوصول والمهارات شائعة فى كل مكان فإن أولئك الذين يفضلون أن يقوموا بالأعمال بطرقهم الخاصة يستطيعون دائمًا أن يتلمسوا طريقًا أو مجموعة من الظروف تتيح لهم أن يعبروا عن أنفسهم أو أن يقوموا بتجاربهم. ويحتاج المستوى المطلوب للإشراف التدخلى أن تتم مراقبة كل شخص يريد بناء جراثيم تتوهج فى الظلام وهى أمر باهظ التكلفة بصورة استثنائية فى غالب الظن وربما تكون غير قابلة للتنفيذ فى الولايات المتحدة[٢٣]. ومع توفر المزيد من قطع لبنات البناء البيولوجية، ومع تزايد الأشخاص الذين لهم حرية الوصول العامة إلى مزيج من مواصفات السَلسَلات والتخليق، فإن مهمة تنفيذ القوانين الناتجة عن تحجيم حرية الوصول أو الممارسة سوف تصبح غير قابلة للدفاع عنها بطريقة متزايدة. وهذا يعود بالمناقشة إلى مأزق كيفية تحجيم مشاركة المستثمرين.

لن تمنع القوانين ظهور تهديدات بيولوجية اصطناعية ولن تمنع الحوادث حتى بين المصرح لهم بالسعى فى تطوير تطبيقات يُفترض أنها غير مؤذية. وعندما يحيق الضرر فعلاً فربما لن نكون مقتنعين بأن العقوبات الجنائية أو المدنية سوف تشكل تعويضًا مناسبًا. وبالتالى، فلعلنا كمجتمع قد نفضل أن ننظم حرية الوصول بالإضافة إلى تشريع العقوبات الخاصة بالأضرار. غير أنه ليس ثمة من خيار جاهز فوق المنضدة يوفر الأمن والسلامة من خلال تنظيم حرية الوصول متزامنًا مع توفير ابتكارات تقنية تكفى للتعامل مع أمور مثل الاستجابة للأمراض المعدية، وتنمية موارد غذائية كافية وآمنة، وإنتاج كميات كبيرة من الوقود الحيوى. وعلى النقيض من ذلك، نجد أن

التشريعات سوف تعوق الابتكار، وبهذا سوف تعوق قدراتنا على الاستجابة للتحديات القادمة. واختيار تحجيم الابتكار سوف ينتهى بنا إلى الحد من قدراتنا وتخفيض درجة استعداداتنا.

عقم الحظر وانعدام جدواه

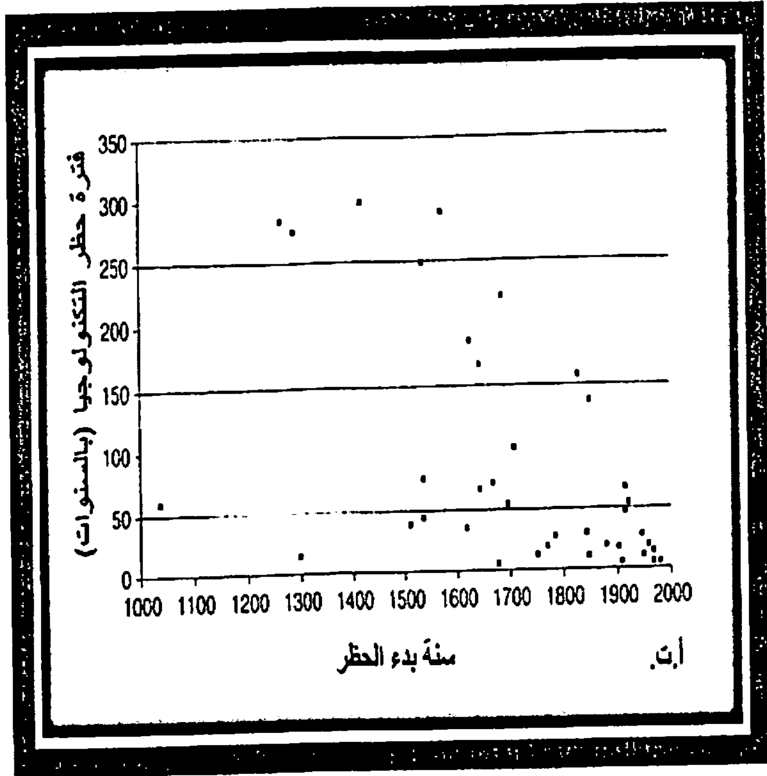
"التاريخ يبين أنه من الصعوبة بمكان أن تقول لا للتكنولوجيا"[٣٤]. كفين كِلى (Kevin Kelly)، هو المحرر المؤسس لمجلة «وايرد: Wired » وباحث منذ أمد بعيد فى دور التكنولوجيا فى المجتمع، وأخيرًا أجرى مسحًا فى الألف سنة الأخيرة عن حظر التكنولوجيا على نطاق واسع، والتى عرفها بأنها "تحذير رسمى ضد تكنولوجيا بعينها صدر على مستوى حضارة أو جماعة دينية أو أمة، وليست ضد فرد أو موقع صغير". وفى حين أن النتائج لم تُنشر حتى الآن إلا على الشبكة العنكبوتية ولم تذكر مصادر مادية أو منهجًا علميًا، إلا أن تجربة كِلى ومكانته كمراقب للتكنولوجيا وتطورها توفر لنا - على أقل تقدير - حكاية ساحرة ومهمة.

ونتائج المسح رائعة وجديرة بالملاحظة لأسباب عديدة. أولها أن كِلى لم يتوصل إلا إلى أربعين مثالاً للحظر تتفق مع معاييره، مما يعنى أنها نادرة. وثانيها، وربما كانت أهمها فى السياق الحالى، أن فترة الحظر يبدو أنها آخذة فى القِصَر. والشكل (١-١) هو رسم بيانى للسنة التى ابتدأ فيها الحظر مقابل طول مدته.

ويؤمن كِلى إيمانًا راسخًا بأن كل التقنيات، وليس فقط التقنيات البيولوجية التى تحددت كَميًا فى الفصل السادس، تتحسن بصورة أُسية بطريقة أو بأخرى. ورأى كِلى أنه "كلما تسارعت التكنولوجيا فكذلك يتسارع اختصار زمن الحظر"، وهى ظاهرة يعززها شيوع حرية الوصول: "إذا أخذنا بالرأى العالمى للتكنولوجيا نجد أن الحظر سريع الزوال. ففى الوقت الذى تُمنع فيه من موقع فإنها سوف تزدهر فى موقع آخر.

وفى أسواق عالمية لا شىء يستبعد. وعندما تُمنع التكنولوجيا محليًا فإنها تعود إلى الحياة فيما بعد على مستويات عالمية"(٣٥).

وحتى لو رأى القارئ فى هذه الأقوال مجرد فرضية وليست استنتاجًا قوى الحجة، فإنها فرضية قوية بمعنى أنها لا تحوى بيانات وثيقة الصلة فحسب وإنما بها جدل نظرى أن التكنولوجيات الجديدة، حتى لو كانت غير مرغوبة عند بعض الناس، إلا أنها تُستغل لفوائدها الاقتصادية أو لأية فائدة أخرى بواسطة أناس آخرين. وعندما تصير تقنية ما مفيدة كرافعة تحرك الاقتصاد، تجنح الاعتراضات إلى التبخر أثناء الاندفاع إلى تطبيق تلك الرافعة فى سبيل تحسين أوضاع الفرد فى العالم. ولقد وصلنا إلى نقطة نجد فيها صناعة مزدهرة على وشك أن تنتج العديد من الروافع، ونحتاج إلى الكثير منها لكى نحسن من أمننا الاقتصادى والمادى. ولن يكون أمرًا بسيطًا أن تمنع رافعة معينة أو نداوم على المنع فى وجه الابتكارات العالمية.



شكل (١٠-١) مدة حظر التكنولوجيا مقابل السنة التى فُرِض فيها الحظر. من كتاب «عبثية الحظر» تأليف كفين كِلى.

الفصل الحادي عشر

وضع الأسس لاقتصاد بيولوجى

من البدهى أن عنوان هذا الفصل متخلف عن الزمن، فنحن لدينا بالفعل اقتصاد بيولوجى مزدهر. فلولا الزراعة الكثيفة المحاصيل لكان مجال المجتمع البشرى ومنجزاته محدودة للغاية، ولولا الوصول إلى البقايا الحفرية للحياة السابقة على الأرض، والتى ننقب عنها الآن كالبترول والفحم وغاز الميثان، لكنا اليوم نفتقر إلى كم هائل من المواد والأسمدة والوقود، ولزاد فقرنا إلى درجة كبيرة. والزيادة فى الإنتاجية الزراعية هى مجرد مثال على التحسن فى التكنولوجيات البيولوجية، وهى أمر وثيق الصلة هنا لأن وزارة الزراعة الأمريكية تدعى أن الزراعة تعتمد على التكنولوجيا لتحقيق نمو إنتاجى أكثر من أى قطاع آخر من قطاعات الاقتصاد[١].

ما حجم الاقتصاد البيولوجى الحالى، وما سرعة نموه؟

فى الخطاب الشعبى تُستَخدَمُ كلمة «التكنولوجيا البيولوجية» أو «البيوتك» فى صور محدودة ومتناقضة. وقد يقتصر استخدامها على وصف منتجات صيدلانية أو فى سياق آخر، لتشير إلى الصناعة المتعلقة بالنباتات المعدلة جينيًا، بينما فى إطار آخر تشير إلى مجموعة من الوقود الحيوى واللدائن والكيماويات وخلاصات النباتات. ولهذا

فإنه من العسير وضع تقييم للقيمة الاقتصادية لشركات التكنولوجيا البيولوجية. كما يزداد الأمر صعوبة عند محاولة فصل بين مكونات العائدات فى الشركات العامة عنها فى شركات التكنولوجيا البيولوجية الخاصة.

وتتراوح تقديرات العائدات الإجمالية فى الولايات المتحدة من ٢٠٠ بليون دولار إلى ٢٥٠ بليون دولار سنويًا، وتعتمد قيمة الدولار على أية مجموعة من المنتجات يشملها الحصر. وتختلف عمليات المسح المختلفة التى توفر تلك المعلومات ليس فقط فى تصنيفها للشركات وإنما أيضًا فى منهجيتها، والتى لا تستطيع دائمًا أن تحصل على بيانات تلخص أنشطة الشركات الاستشارية الخاصة. ويزيد من تعقيدات الوضع أن البيانات المتعلقة بالشركات الخاصة مستقاة من هذه الشركات، وكثيرًا ما لا نجد وثائق معلنة يمكن استخدامها فى التثبت من هذه المعلومات بواسطة جهة مستقلة. ويقترح تقدير، مبنى على بيانات يعود تاريخها إلى ٢٠٠٤، أن ما يقرب من ٨٥ بالمائة من كل شركات التكنولوجيا البيولوجية الصيدلانية هى شركات خاصة، وهى مسئولة عن أقل من ٥٠ بالمائة من العمالة فى هذا القطاع و٢٧ بالمائة من عائداته[٢].

وسوف نتفحص هذه البيانات فيما يلى بمزيد من التفصيل، ولكنى سأذكر ملخصًا سريعًا كما يلى: بدءًا من ٢٠٠٧ بلغت مبيعات التكنولوجيا البيولوجية فى الأدوية نحو ٧٩ بليون دولار على مستوى العالم، منها ٨٥ بالمائة داخل الولايات المتحدة. وبلغت عائدات المحاصيل المعدلة جينيًا ما يقرب من ١٢٨ بليون دولار، منها ٥٤ بالمائة داخل الولايات المتحدة. وأسهمت التطبيقات الصناعية (وتشمل الوقود والكيماويات والمواد والكواشف والخدمات) بما يتراوح بين ٧٠ بليونًا إلى ١٠٠ بليون دولار داخل الولايات المتحدة، وفقًا لمن كان يقوم بالحسابات وكيفية ذلك. ويبدو أن معدل النمو السنوى على مدى العقد الأخير بلغ ١٥-٢٠ بالمائة للتطبيقات الطبية والصناعية و١٠ بالمائة للتطبيقات الزراعية. وبعد تمحيص فى مجموعات مختلفة من الأرقام، أقدر أنه بدءًا من أواخر ٢٠٠٨، بلغت عائدات التكنولوجيا البيولوجية داخل الولايات المتحدة نحو ٢٢٠ بليون دولارًا - وهو نشاط اقتصادى يعادل ما يقارب

٢ بالمائة من الدخل القومى العام - وهى تنمو سنويًا بمعدل يبلغ ١٥-٢٠ بالمائة (انظر الجدول ١١-١). ويبلغ الدخل القومى العام للولايات المتحدة سنة ٢٠٠٧ نحو ١٤ تريليون دولار ونما بمعدل نحو ٢,٢ بالمائة[٣].

التكنولوجيا البيولوجية فى الرعاية الصحية

يمكن تصنيف الأدوية إلى مجموعتين تقريبًا. أولاهما «الجزيئات الصغيرة» وهى كيانات كيميائية عادة ما تُنتَجُ بالتخليق الكيميائى بغرض الاستخدام البشري. وثانيتها هى «البيولوجيات» وهى بروتينات أو أحماض نووية عادة ما تُنتَجُ فى أنظمة من مزارع الخلايا أو تُستخلص من نباتات أو حيوانات، وكثيرًا ما تكون الجراثيم المنتِجة معدلة جينيًا بهدف تحسين الحصيلة الناتجة. وبمعنى آخر، تأتى الجزيئات الصغيرة من وضع كيماويات فى وعاء وتقليبها، أما البيولوجيات فتأتى من جراثيم.

ويصل حجم مبيعات الصناعات الدوائية إلى نحو ٢٥٠ بليون دولار سنويًا فى الولايات المتحدة و٦٠٠ بليون دولار عالميًا، بمعدل نمو حديث يبلغ ٦-٨ بالمائة فى الولايات المتحدة و٨١ بالمائة فى الأسواق البازغة[٤]، وتراوحت تقديرات مبيعات البيولوجيات فى الولايات المتحدة بين ٥٠ بليون دولار، و٦٧ بليون دولار فى سنة ٢٠٠٧، مع زيادة النمو السنوى ٢٠ بالمائة على السنوات الخمس السابقة[٥].

جدول (١١-١) العائدات من الأنظمة المعدلة جينيا سنة ٢٠٠٧

القطاع	العائدات العالمية (بليون دولار)	العائدات الأمريكية (بليون دولار)	النسبة من الدخل القومى المحلى الإجمالى ١٣ بليون دولار	نسبة نمو العائدات
البيولوجيات	٧٩	٦٧	٠,٤٨	١٥-٢٠
البيوتك الزراعية	١٢٨	٦٩	٠,٤٩	١٠
البيوتك الصناعية	١١٠	٨٥؟؟	٠,٦١	١٥-٢٠

أما باقى سوق الأدوية - وهو الجزيئات الصغيرة - فيعتمد بشدة على التكنولوجيا البيولوجية أثناء تطويره وتجاربه الإكلينيكية. ويمكن القول إنه نظراً لأن تطوير أدوية ذات جزيئات صغيرة يحتاج لاستخدام أدوات التكنولوجيا البيولوجية، فإنه يتعين إدراج الصناعات الدوائية بكاملها فى تقديرات إسهام التكنولوجيا البيولوجية فى الاقتصاد الإجمالى. وحاليًا يجرى اختبار غالبية الأدوية أولاً فى أنظمة نمذجة، تبدأ بخلايا وحيدة ثم تنتقل ببطء فى كائنات نموذجية مثل الفئران والأرانب والنموس والكلاب والرئيسات. وتقاس تأثيرات الأدوية فى هذه الأنظمة عن طريق فحوصات جزيئية مختلفة: بعضها يرصد الحالة الفيزيائية للدنا، وبعضها يرصد تحويل المعلومات المشفرة فى الجينات، وبعضها الآخر يقيس كمية البروتينات وتفاعلاتها أو مستويات النواتج المختلفة للأيض.

وفى حين أن الجزء الذى تشكله مبيعات الأدوية المعتمدة على أدوات التكنولوجيا البيولوجية هو فى أغلب الظن تحت مراقبة لصيقة داخل شركات الدوائيات، إلا أنه من الصعوبة بمكان تقديرها من خارج تلك الشركات. فإذا كانت كل الجزيئات الصغيرة الموجودة فى السوق اليوم هى نتاج عمليات تطويرٍ واختبارٍ تعتمد على التكنولوجيات البيولوجية (من المؤكد أن ذلك مبالغة فى التقدير)، فإن ذلك يضيف ٢٥٠ بليون دولار إلى الجزء الذى تسهم فيه التقنيات البيولوجية الصناعية والزراعية فى الناتج القومى العام، مما يجعله يصل إلى نحو ٤٧٠ بليون دولار أو ما يقرب من ٤ بالمائة من الناتج القومى العام. ولكن حتى إذا كان نصف مبيعات الجزيئات الصغيرة فقط يمكن أن نعزوه إلى الاعتماد على التقنيات البيولوجية، فإنه ما زال من الممكن اعتباره مبلغًا كبيرًا من الأموال.

وتقديرات مستقبل العائدات فى مجال الرعاية الصحية من التقنيات البيولوجية هى من الأمور العسيرة وهو أقل ما يمكن قوله. وقد تكون للتقنيات البيولوجية فى المستقبل تأثيرات كبيرة سواء على قدرات ممارسى الرعاية الصحية أو على العائدات من الصناعات الدوائية. ومن الممكن أن تغير المقدرة على استخدام الهندسة الرشيدة فى إنتاج بيولوجيات أو أنسجة بديلة، حسب التكلفة والإمكانات، أن تغير من أحوال البشر. غير أن ثمة أمورًا لا يستهان بها تقف عثرة فى سبيل منطق مبسط.

وطوال هذا الكتاب، لم أستكشف بصفة عامة التطبيقات العديدة للهندسة البيولوجية فى مجال الرعاية الصحية للبشر. والسبب المباشر لهذا الإغفال هو ببساطة أن المجال بالغ التعقيد من كل الزوايا، بما فيها الآليات الجزيئية الحقيقية لتأثيرات الأدوية، وكذلك مقاييس الكفاءة المستخدمة فى التجارب السريرية، وخطوات التصنيع، وتحليلات جدوى تكلفة تبنى دواء جديد، وحصول الدواء على الإجازات اللازمة، وتسويقه لدى الأطباء والمرضى.

وحتى فى سوق للبيولوجيات يتسم بمعدل نمو عالٍ، فإن من السهل الوقوع فى كبوات. وقد سحبت شركة فايزر أخيرًا من الأسواق الإنسولين القابل للاستنشاق

الذى تنتجه نظراً للضعف المتناهى لمبيعاته، رغم ما بدا فى البداية من مزايا هائلة له على الإنسولين بالحَقن. ولسوء حظ فايزر، لم يرق للمرضى جهاز الاستنشاق، والدواء يكلف أكثر من بدائله، ولم تتحمس شركات التأمين لأن تدفع ما يقرب من الضعف مقابل كل جرعة من دواء لا تسهم مبيعاته بأكثر من ١٧ مليون دولار مقابل توقعات ببلايين الدولارات. ولهذا قررت فايزر أن تتحمل خسارة مقدارها ٢,٨ بلايين دولار بإلغائها إنتاج وتوزيع الدواء(٦). ويدل ذلك على أن المنتجات الراقية من ناحية التكنولوجيات البيولوجية، حتى ولو كانت موجهة إلى أسواق كبيرة مثل سوق المصابين بداء السكرى، قد باتت بالفعل سلعًا فى سوق تنافسى، ومعرضة مثل كل السلع لاختلافات السعر واختيارات المستهلكين.

ومع نضج تقنيات الإنتاج البيولوجى، لن تزداد المنافسة إلا مع انتشار طرق جديدة، ومع دخول منتجين جدد إلى السوق. ومن الجائز أن البيولوجيات الخارجة عن نطاق براءات الاختراع (off-patent) سوف تمثل تحديًا لشركات الصناعات الدوائية أكبر مما تفعل أدوية الجزيئات الصغيرة غير المحمية ببراءات الاختراع ((generic)؛ ولقد ترتب على الأدوية الخارجة عن نطاق براءات الاختراع وتلك غير المحمية بها أن انخفضت مبيعات الأدوية ذات العلامة التجارية بمقدار ١٨ بليون دولار فى سنة ٢٠٠٦ وحدها(٧).

وتعانى الصناعات الدوائية جزئيًا بسبب محاولة الشركات أن تعالج مشكلة داخلية عويصة. فالسعى لإصلاح الجسم البشرى بدون وجود كتيبات إرشادية للهندسة ليس من الأمور اليسيرة. ولقد انخفضت التصديقات على أدوية جديدة من نوع الجزيئات الصغيرة بما، يقارب ٣٠ بالمائة فى العقد الأخير، رغم مضاعفة الإنفاق على «البحوث والتطوير» وتزايد اكتشاف أدوية جديدة مرشحة لذلك(٨).

وثمة إستراتيجية فى مواجهة تصديقات الأدوية الجديدة هى التركيز على القطاع من الجمهور الذى ترتفع فيه احتمالات أن يكون فيه الدواء مؤثرًا، وهو فرع جديد بازغ

فى الرعاية الصحية يسمى «الطب المُشَخْصَن». وهو «تفصيل» العلاج على الشخص ويعتمد على علوم «الجينومية الدوائية:pharmacogenomics(*) » التى تهدف إلى تفصيل العلاجات وفقًا للتركيبة الجينية لمريض معين[٩]. وعلى جانب آخر من تحديد العلاجات بناءً على جينوم المريض يقع «التشخيص الدوائى: theragnostics » وهو اندماج بين استخدام الدواء فى العلاج ووسائل التشخيص، ولا يركز على «الاختلافات الجينية "وإنما إلى حد ما على دمج المعلومات من واسمات (علامات) بيولوجية متباينة (مثل واسمات جينومية أو بروتيونية(**) أو أيضية)"[١٠].

إن الرغبة والحاجة الجلية لتفصيل علاج ونظام دوائى على الأشخاص يساعدان على توضيح نزعة حديثة فى الاقتناء. فالشركات الدوائية تشترى مؤسسات توفر أدوات وخدمات تشخيصية. وقد أنفقت شركة روش أربعة بلايين دولار فى سنة ٢٠٠٧ وحدها[١١]. وتنعكس هذه الظاهرة أيضًا على مبيعات الدواء، بارتفاع نصيب أدوية تهدف إلى آليات بعينها (مثل التعارض مع بروتييزات فيروس نقص المناعة المكتسبة (إتش آى فى (HIV) أو زيادة إنتاج كريات الدم الحمراء بدلاً من «الإقلال من الالتهاب»)، وارتفاع نصيبها من عائدات النمو من الثلث إلى الثلثين فيما بين (٢٠٠٠ -٢٠٠٦) ولم تستهدف الأمراض المزمنة المستمرة مثل السكرى أو ارتفاع ضغط الدم، إلا ٢٥ بالمائة من الأدوية الجديدة فقط، "مما يشير إلى أن خط الأنابيب يتحول فى اتجاه علاجات استهدافية"[١٢].

(*) العلم الذى يتناول سبل التعويض عن الاختلافات الجينية التى تسبب عند المرضى تباينًا فى الاستجابة لدواء معين. (المترجم)

(**) البروتيونية فرع من فروع التكنولوجيا البيولوجية يتناول تطبيق تقنيات البيولوجيا الجزيئية والكيمياء الحيوية وعلوم الوراثة لدراسة تركيب ووظائف وتفاعلات البروتينات التى تنتجها جينات خلية معينة أو نسيج معين أو كائن معين، مع تنظيم المعلومات فى قواعد بيانات وتطبيقات البيانات. (المترجم)

التكنولوجيا البيولوجية الزراعية

وفقًا لما جاء فى ملخص تقرير مكتب التعداد الإحصائى الأمريكى، بلغت قيمة الإنتاج الزراعى فى الولايات المتحدة نحو ٣٠٠ بليون دولار سنة ٢٠٠٦[١٣]. وثمة تقدير آخر زاد كثيراً من هذه القيمة: على الأقل ٨٠٠ بليون دولار سنويًا بدءًا من سنة ٢٠٠١[١٤]. والزيادة المفاجئة السريعة الحديثة فى أسعار السلع ستدفع بهذه الأرقام إلى مزيد من الارتفاع، رغم أن تلك البيانات ليست متاحة بعدُ. ولا تزال المحاصيل المعدلة جينيًا تشكل جزءًا ضئيلاً من العائدات الإجمالية. وبداية من عام ٢٠٠٧، تمت زراعة ١١٤ مليون هكتار من المحاصيل المعدلة جينيًا على مستوى العالم، على نحو ٩ بالمائة من إجمالى المساحات المزروعة فى العالم، بقيمة تربو على ١٠٠ بليون دولار. وزادت المساحات المزروعة بالمحاصيل المعدلة جينيًا سنويًا بما يزيد قليلاً على ١٠ بالمائة فى العقد الأخير، منها ٥٤ بالمائة مزروعة فى الولايات المتحدة؛ وفى ٢٠٠٧ شكلت المحاصيل المعدلة جينيًا، من بين المحاصيل الرئيسية على مستوى العالم ٦١ بالمائة من الذرة، و٨٣ بالمائة من القطن، و٨٩ بالمائة من فول الصويا[١٥]. وفى الولايات المتحدة سنة ٢٠٠٧، شكلت المحاصيل المعدلة جينيًا ٧٣ بالمائة من الذرة و٨٧ بالمائة من القطن و٩١ بالمائة من فول الصويا، بعائد إجمالى للزراع بلغ ما يقرب من ٦٩ بليون دولار من هذه المحاصيل وحدها[١٦]. وزادت الصين من مساحاتها المزروعة بالمحاصيل المعدلة جينيًا بحوالى ٢٠ بالمائة بين ٢٠٠٦ و٢٠٠٧[١٧]. وفى ٢٠٠٨ بلغت العائدات العالمية من المحاصيل المعدلة جينيًا نحو ٨ بلايين دولار[١٨]. وربما تصل إلى ٥٠ بليون دولار بحلول ٢٠٢٥[١٩]. وعلى نفس الشاكلة، تزرع البرازيل والأرجنتين وكندا مساحات متزايدة مع نسبة متزايدة من المحاصيل المعدلة جينيًا[٢٠].

وفى حين يتم تعديل المحاصيل المعدلة جينيًا بتعديل جين وحيد مما يغير من سمة واحدة، إلا أن الجيل التالى سوف يحوى جينات متعددة تتيح من خلال

تفاعلاتها سمات أكثر تعقيداً. ومن بين السمات المطلوبة سمة تَحَمُّل الجفاف. وفى السنوات الأخيرة تسبب نقص المياه فى انخفاض المحاصيل الزراعية فى أستراليا بما يقرب من ٤٠ بالمائة. ويتراوح متوسط الخسارة فى الولايات المتحدة سنوياً فى سنوات الجفاف بين ٥ بلايين دولار و٦ بلايين دولار[٢١]. ومن المتوقع أن تبلغ تكلفة تطوير محاصيل تتحمل الجفاف من الكِبَر ما يحمل أكبر شركات التكنولوجيات البيولوجية الزراعية على التشارك معًا كى تتقاسم الأخطار والأعباء المادية: فقد تشاركت مونسانتو مع باسف، ووقعت ديبونت اتفاقات مع داو وسينجنتا. ومن الجلى أيضًا أن الطلب على الحبوب جد كبير، مع تزايد الواردات إلى آسيا وتخصيص جانب مؤثر من الناتج الزراعى العالمى فى إنتاج محاصيل إنتاج الطاقة. وتراهن شركات التكنولوجيات البيولوجية الزراعية المتعددة الجنسيات على قدرتها على تلبية هذا الطلب بالمحاصيل المعدلة جينيًا. غير أن الطلب على تلك المحاصيل ليس موحداً حول العالم.

وثمة مصدر آخر للتعقيدات داخل الأسواق وهو الاعتناق العام لمزارعى الولايات المتحدة لفكرة المحاصيل المعدلة جينيًا بالتزامن مع رفض المستهلكين الأوربيين لتلك المحاصيل. وفى حين تشكل المنطقة الأوربية فى الوقت الحاضر شبكة لتصدير الغذاء، فإن جانبًا كبيراً من علف الماشية والدواجن يأتى من الأمريكتين. غير أن الاشتراطات الصارمة والفحص لسلامة الغذاء والعلف المحتويين على محاصيل معدلة جينيًا تكاد تصل إلى مستوى الصفر فى التسامح مع استيراد المنتجات المعدلة جينيًا. وعلى الرغم من أن بنجر السكر المعدل جينيًا وبعض أنواع الذرة المعدلة جينيًا قد تحصل على موافقات رسمية للبيع فى أوربا، فإنه يبدو أن المستهلكين يتجنبون المنتجات التى تحمل بطاقات تفيد تعديلها جينيًا. ولهذه السياسة آثار ثانوية خلابة، وهى أنها سوف تفضى إلى تقليص مثير للإنتاج الأوربى للماشية بسبب النسبة المتزايدة فى الحبوب المعدلة جينيًا، كما يذكر بيتر ميتشل: "إذا لم يوجد حل، فإن المزارعين الأوربيين سوف

يُجبَرون على ذبح قطعان ماشيتهم بالجملة بدلاً من أن يتركوها تعانى المجاعة. وساعتها سوف تضطر أوربا إلى استيراد كميات هائلة من المنتجات الحيوانية من أماكن أخرى، وللمفارقة، فإن غالبية تتربى على نفس العلف المعدل جينيًا الذى لم توافق عليه أوربا"[٢٢]. وقد تخف وطأة هذه المشكلة لو تغيرت السلوكيات بما يحمل تغيرات فى البيئة التسويقية يجعلها ودية أكثر تجاه المنتجات المعدلة جينيًا. غير أن مقاومة المستهلكين للمنتجات المعدلة جينيًا فى أوربا عميقة بقدر ما هى واسعة الانتشار. وحتى فى مواجهة الضائقة الاقتصادية، التى تسبب فيها تقليص تصدير الأغذية وارتفاع الأسعار المحلية، فإن المستهلكين والمجموعات المهتمة قد تستغرق سنين طوال لتغيير فكرهم، هذا إن تغير.

وتشكل التفاعلات المعقدة بين المستهلكين والمجموعات المهتمة والمنظمين أخطارًا جسيمة للشركات التى تطور محاصيل معدلة جينيًا. وعلاوة على ذلك، وبالإضافة إلى التعامل مع المعارضة الصريحة لمنتجاتها، تواجه تلك الشركات أخطارًا مالية إضافية متعلقة بأحكام المحاكم التى تتناول إجراءات الحصول على موافقات، بعد أن تصير المنتجات فى الأسواق بالفعل. ففى ربيع ٢٠٠٧، أبطل القاضى تشارلز بريار من المحكمة الجزئية الأمريكية الموافقة التى كانت قد مُنِحت سنة ٢٠٠٥، لنبات الفصفصة (alfalfa) مقاوم لمبيد عشبى بحجة أن الوكالة قد خالفت القوانين الفدرالية بعدم دراسة التأثيرات البيئية والاقتصادية للسلالة المعدلة جينيًا دراسةً وافية. ويشكل نبات الفصفصة سوقًا تبلغ قيمته ٨ بلايين دولار للمزارعين الأمريكيين، منها ١٧ بالمائة يتم تصديرها إلى دول لا تشعر براحة تامة مع المحاصيل المعدلة جينيًا. ويشكل إعادة النظر فى الموافقات السابقة قلقًا لشركات التكنولوجيا البيولوجية الزراعية، كما يعلق أحد المعلقين: "إن الحكم الخاص بنبات الفصفصة هو واحد من سلسلة حديثة من الأحكام الصادرة من المحاكم الفدرالية والجزئية لا تتناول حجم المحصول فحسب وإنما أيضًا الأوضاع القانونية غير المستقرة للأنشطة المتعلقة بالمحاصيل المعدلة جينيًا"[٢٣].

ونستطيع أن نعثر على بيان بالأخطار المحتملة لإطلاق المحاصيل المعدلة جينيًا فى الحياة البرية فى تقديرات تكاليف الأنواع الغازية(*). فبداية من ٢٠٠٥، قُدِّرَتْ التكاليف الإجمالية للأنواع الغازية فى الولايات المتحدة بنحو ١٢٠ بليون دولار، وهى تقديرات متحفظة، ويشمل ذلك تكاليف المكافحة والأضرار المباشرة التى تصيب المحاصيل والممتلكات وصحة البشر والحيوان وموارد المياه. ومن اللافت للنظر أن نلحظ أن ما يقرب من ٩٨ بالمائة من القيمة الإجمالية التى تضاف إلى أنظمة الغذاء الأمريكية تأتى من أنواع غير محلية مثل الذرة والقمح والأرز والماشية والدواجن. ويذكر كاتبو البيان "إذا استطعنا أن نضع قيمًا مالية لانقراض الأنواع وفقدان التنوع البيولوجى، وفوائد النظام الإيكولوجى وضياع الجماليات، فإن تكلفة الأنواع الغازية الغريبة والمدمرة سوف تتجاوز بلا ريب أضعاف مبلغ ١٢٠ بليون دولار سنويًا. وعلى الرغم من ذلك، فإن تلك الخسائر الاقتصادية المقدرة بأقل من قيمتها تدل على أن الأنواع الغازية الغريبة تغتصب حصيلة هائلة"(٢٤). والعديد من الأنواع التى شملتها تقديرات الأضرار كانت فى الأصل قد أُدخِلت إلى الولايات المتحدة على أمل أنها أيضًا سوف تسهم فى الاقتصاد، مما يثبت أنه لا يزال أمام البشر طريق طويل حتى يستوعبوا تأثيرات التلاعب فى الأنظمة البيولوجية التى نعيش فيها.

التكنولوجيا البيولوجية الصناعية

إن حجم التكنولوجيا البيولوجية الصناعية هو أكثر الإشكاليات صعوبة فى التقييم، وذلك لأن أجزاء منه قد تُنسَبُ إلى التكنولوجيا البيولوجية الصيدلانية أو إلى

(*) الأنواع الغازية تعبير يُطلق على كل أنواع النباتات والحيوانات التى تغزو منطقة ما مثلما غزا ورد النيل مجرى النيل منذ بناء السد العالى، وكذلك غزوات أسراب الجراد وما إلى ذلك. ولا ننسى أيضًا عندما تم إدخال الأرانب إلى قارة أستراليا فى بدء استعمارها لكى تأكل الحشائش الضارة فتكاثرت حتى التهمت المحاصيل وتسببت فى مجاعات. (المترجم)

الصناعات الكيماوية. ويرجع الفضل فى النمو السريع فى السنوات الأخيرة للتكنولوجيا البيولوجية الصناعية إلى الازدهار المدوى للوقود الحيوى. ويضاف إلى ذلك أن أعباء التشريعات المنظمة أقل كثيراً، على الأقل بسبب أن غالبية الإنتاج الصادر عن هذه الفئة ليس مقصوداً به استخدامه كأدوية، كما أنها تستخدم مواد خامًا لا تنتمى لنوعية المحاصيل المعدلة جينيًا. ونجد أن منتجات التكنولوجيا البيولوجية الصناعية متغلغلة فى اقتصاد الولايات المتحدة، من إنزيمات غسيل الملابس إلى المكملات الغذائية إلى اللدائن البيولوجية إلى الإنزيمات والجراثيم التى تنتج الوقود الحيوى.

وتقديرات ماكينزى وشركائه تقرر أن التكنولوجيا البيولوجية الصناعية "بحساب المنتجات المصنوعة من مواد خام مبنية على البيولوجيا أو من خلال تخمير أو تحويل إنزيمى"، وصلت مبيعاتها فى الولايات المتحدة إلى ٥٠ بليون دولار سنة ٢٠٠٢ و٧٧ بليون دولار سنة ٢٠٠٥ وإلى نحو ٨٥ بليون دولار سنة ٢٠٠٧[٢٥]. ويعود الجانب الأكبر من تلك القفزة المثيرة إلى تصاعد إنتاج الوقود الحيوى. وتمثل العائدات سنة ٢٠٠٥ سبعة بالمائة من المبيعات داخل النطاق الأشمل للصناعات الكيماوية، وتنبأ ماكينزى بأن سنة ٢٠٠٦ سوف تشهد ارتفاعًا فى المبيعات إلى ١٠ بالمائة من تلك الصناعة بحلول ٢٠١٠، مما يصل بها إلى ١٢٥ بليون دولار. ويمثل هذا الرقم تعديلاً تخفيضيًا لتقديرات سنة ٢٠٠٤ والتى بلغت ١٦٠ بليون دولار، ويمثل ٢٠ بالمائة من عائدات الصناعات الكيماوية[٢٦].

ملخص الاقتصاد البيولوجى حسب القطاعات

تشكل هذه الخلفية الإطار لما نشهده اليوم من زيادة الاعتماد على التعديلات الجينية للأنظمة البيولوجية فى سبيل إنتاج الغذاء والأدوية والمواد والوقود. وفى خضم التصاعد العالمى الحالى لقطاع المحاصيل المعدلة جينيًا والوقود الحيوى والمواد، فمن الجلى أننا على أعتاب استخدامات البيولوجيا بطرق جديدة. ويستحق الإسهام النسبى

للقطاعات المختلفة بالنسبة للإجمالى أن نتدارسه. وإلى عهد قريب تسيدت الأدوية عائدات "التكنولوجيا البيولوجية" فى الولايات المتحدة، ولكنها الآن لا تفسر إلا أقل من نصف القيمة الإجمالية. ويدل ذلك على أن التقنيات البيولوجية تزداد نضجًا وتصبح أكثر فائدة وشيوعًا فى قطاعات مختلفة من الاقتصاد، وسوف تحتل التطبيقات الصناعية والزراعية نصيبًا أكبر بكثير فى إجمالى العائدات. ويضاف إلى ذلك، أنه فى حين تقع غالبية التطبيقات فى مجال الرعاية الصحية والمجالات الزراعية تحت مظلة قواعد تنظيمية من نوع أو آخر، إلا أن أغلب التطبيقات الصناعية لا تنطبق عليها هذه القاعدة. ويعنى ذلك أن القطاع المعتمد على التكنولوجيا البيولوجية الذى يشكل أسرع نمو فى إسهامه فى الاقتصاد، والآن هو أكبر هذه القطاعات، هذا القطاع ليس تحت أية قواعد تنظيمية.

لنتذكر أن الصناعة بصفة عامة يعمل بها الآن نحو ٢٥٠.٠٠٠ شخص داخل الولايات المتحدة[٢٧]. ولا تمثل هذه العمالة المدربة إلا السُدُس من ١ بالمائة من إجمالى قوة العمالة فى الولايات المتحدة بينما تمثل ٢ بالمائة من الناتج المحلى الإجمالى، وبهذا تسهم بصورة غير متناسبة فى الاقتصاد الأمريكى.

وليس من الواضح الحصة التى سوف تشكلها فى النهاية التكنولوجيا البيولوجية من الناتج المحلى العام لأى قطر من الأقطار. فالبيولوجيا هى مجرد وسيلة لإنتاج السلع، ولا بد من أن تتنافس مع التكنولوجيات الموجودة حاليًا والمستقبلية التى قد تكون أكثر مناسبة لأغراض بعينها. بيد أن ثمة إمكانيات احتمالية هائلة للنمو الاقتصادى عن طريق تنمية التكنولوجيات البيولوجية وانتشارها فى كل مناحى الاقتصاد.

وتشكل منطقتا الوقود الحيوى والمواد أقدم وأوضح أمثلة للتأثيرات الاقتصادية القادمة للتكنولوجيا البيولوجية. وبوصفه سلعة أساسية، يشكل لنا الوقود الحيوى مثالاً لإحدى نهايتى نطاق المنتجات البيولوجية. وفى حين تُنتَجُ «البيولوجيات» (وهى الأدوية المشتقة بيولوجيًا) بأحجام صغيرة ذات قيمة جد عالية، ربما تصل إلى عدة ملايين من

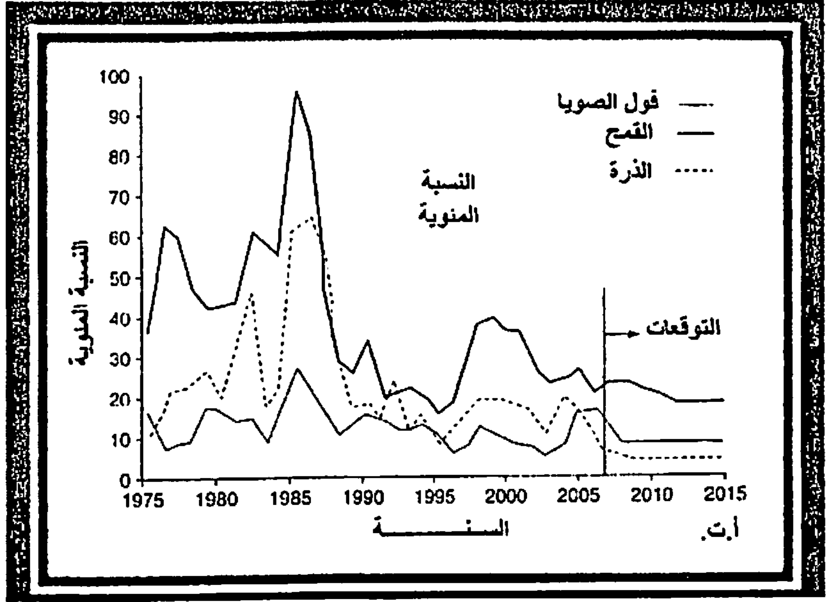
الدولارات لكل كيلوجرام، يُنتَجُ الوقـود الحيوى بأحجام بالغة الضخامة بتكاليف منخفضة وهامش ربح ضئيل. ويضاف إلى ذلك أن إنتاج الوقود الحيوى يتطلب كميات هائلة من المواد الخام. وفى سنتى ٢٠٠٦ و٢٠٠٧، أصدرت حكومات متعددة حول العالم قرارات لاستخدام الوقود الحيوى لا تتضمن زيادات كبيرة فى المواد الخام المكرسة لإنتاج الطاقة فحسب، وإنما يبلغ من كِبر حجمها أنها لا يمكن الوفاء بها دون ظهور تقنيات جديدة.

فى الطريق إلى بناء وقود حيوى

من المرجح أن التقنيات التى تؤدى إلى إنتاج الوقود الحيوى سوف تظهر فى الأسواق على ثلاث مراحل على مدى العقد القادم. وتعتمد تفاصيل هذه المقولة على كلٍّ من الاستمرارية فى التوجهات التكنولوجية الحالية وعلى التقدم الذى يُحرَزُ فى مجالات البحوث والتطوير والتى لا يمكن التنبؤ بها بسهولة. ومع ذلك، فإنه من الممكن أن نقرر شيئًا واقعيًا محددًا عن حالة السوق وعن احتمالات مصادر جديدة للوقود.

المرحلة الأولى: التعارض بين الغذاء والوقود

يتسم السوق الحالى للوقود الحيوى بوجود علاقة تربط بين المحاصيل المستخدمة كمواد خام وبين استخدام تلك المحاصيل كطعام للبشر أو علف للحيوان. والأسعار الحالية للذرة هى إشارة لهذه العلاقة: فكثير من المحللين يعزون الزيادات الحديثة فى



شكل (١١-١) نسبة مخزون الذرة والقمح وفول الصويا إلى الاستهلاك السنوى. والتوقعات مقصود منها بقاء النسب منخفضة فى السنوات القادمة وفقًا للمنظور التاريخى.

والظاهرة العامة وراء ارتباط أسعار الحبوب وأسعار الوقود الحيوى ليست فى استخدام الحبوب لصناعة الوقود الحيوى فى حد ذاته وإنما فى الطلب العام المتزايد على الحبوب. وكنتيجة لذلك فقد انتهى فائض الحبوب الذى كان يميز الأسواق طوال العقود الماضية، وليس متوقعًا أن يعود قريبًا (انظر الشكل ١١-١)[٢٨]. وإضافة لذلك، نجد أن الانخفاضات التى تستوقف النظر فى المخزون العالمى من الحبوب، والتى فى ظروف مختلفة قد تصلح كسند للغذاء، تشير أن "التغيرات العامة للأسعار وتقلباتها فى قطاع الزراعة من المرجح أنها سوف تتفاقم"[٢٩].

وعلى الرغم من الدعاوى الشائعة بأن ارتفاع الأسعار هو نتيجة الحماس الزائد فى تحويل الغذاء إلى وقود، فإن الأوضاع الحقيقية أكثر تعقيداً. وفى حين يبدو أن

استخدام الذرة فى صناعة الإيثانول يسهم فى رفع أسعار الغذاء، إلا أن هذه العلاقة بين السبب والنتيجة قد انعكست فيما يتعلق بزيت النخيل.

ففى ٢٠٠٥ وأوائل ٢٠٠٦، كانت زيوت النخيل تعتبر مصدرًا ممتازًا للزيوت النباتية الصالحة للتحويل إلى ديزل حيوى. وصب المستثمرون الأوربيون والأمريكيون والآسيويون أموالاً فى الشركات القادرة على تكرير تلك الزيوت على أمل استثمار القرارات الحكومية بضخ الديزل الحيوى فى مجرى الوقود. وفى الوقت الذى جرت فيه تلك الاستثمارات، بدا أن ثمة مزايا مالية هائلة من بيع الديزل الحيوى، نظرًا لتزايد أسعار الوقود المشتق من البترول.

غير أنه حدث بدءًا من منتصف ٢٠٠٨ أن زيت النخيل الخام صار يباع بثمن أعلى بما يقرب من ٣٠ بالمائة من سعر الجملة للديزل التام الصنع. فقد زادت الأسعار بصورة حادة خلال ٢٠٠٦ و٢٠٠٧، وكان السبب الرئيسى لذلك هو الزيادات الهائلة فى الطلب على زيوت النخيل فى أسواق الغذاء فى آسيا(٣٠). وأسهم ذلك فى تصعيب فكرة شراء زيت النخيل من الأسواق المفتوحة بهدف إنتاج الديزل الحيوى. وفى الحق، لم يمكن أبدًا تحقيق الزيادة الكبيرة فى القدرة التكريرية لزيوت النخيل التى كان مخططًا لها فى سنتى ٢٠٠٥ و٢٠٠٦ بسبب تصاعد أسعار زيت النخيل(٣١). وتوقفت المصانع حول العالم عن العمل، أو عملت بالخسارة لتفى بعقود موقعة عندما كان تكرير زيت النخيل يأتى بعائد ربح مريح. وبصرف النظر عن مستقبل أسعار زيت النخيل، تبقى استخدامات هذه الموارد مصدرًا للتوتر فى الأسواق بين الغذاء والوقود.

ولسوف يستمر التعارض بين الغذاء والوقود طالما بقى التنافس على المواد الخام. وسوف تتحسن الأمور من جراء تزايد الحصيلة من الحبوب الغذائية التقليدية. ولقد تضاعف محصول الذرة فى الولايات المتحدة أكثر من ثلاثة أضعاف فيما بين ١٩٥٠ – ٢٠٠٠(٣٢). ومع متوسط لمحصول الذرة فى الولايات المتحدة يبلغ نحو ١٦٠

بوشلاً(*). لكل فدان فى المزارع العاملة فإن المزارع التجريبية فى الولايات المتحدة تقترب من ٣٠٠ بوشل للفدان. ومن المتوقع ظهور تحسن تدريجى مماثل فى أقطار أخرى. وعلى سبيل المثال، نجد أن متوسط محصول الفدان فى الصين فى عام ٢٠٠٦ قد بلغ نحو ٨٥ بوشلاً للفدان الواحد، ولدينا من الأسباب ما يجعلنا مقتنعين بأن السلالات الجديدة من الذرة التى زُرِعت فى الصين سوف تستمر حصيلتها فى الارتفاع. غير أنه فى حين أن إنتاج الذرة قد يتزايد، نجد أن الطلب على الذرة قد يتزايد بمعدلات أسرع. وفى ٢٠٠٨ كان من المتوقع أن يرتفع إنتاج الذرة فى الصين بنسبة ١٫٤ بالمائة، بينما كان المتوقع أن يرتفع الطلب بما يكاد يصل إلى ٣ بالمئة[٣٣]. وحدث عجز فى الإنتاج المحلى اضطرت الصين على إثره فى ديسمبر ٢٠٠٦ إلى فرض حظر على تحويل كميات إضافية من الذرة إلى إيثانول[٣٤]. ويبدو أن الصين قررت، كسياسة، أن استخدام الذرة كطعام وعلف أهم من استخدامه مادة خامًا لصناعة الوقود.

إن الأهداف الحكومية حول العالم من استخدامات الإيثانول تبلغ من الارتفاع حداً قد تنتج عنها مشاكل خطيرة فى الإنتاج خلال بضع سنوات. ويشرح هذا الأمر وارن ستانلى رئيس مجلس إدارة شركة كارجيل قائلاً: "إذا لم تتوفر لدينا زيادات هائلة فى الإنتاجية فسوف نواجه مشكلات هائلة فى إنتاج الطعام. وعلى العالم أن يختار بين الأمرين"[٣٥].

ومعنى وجود نقص عالمى فى فائض حبوب الأغذية والأعلاف، أنه يتعين على صناعة الوقود الحيوى أن تبحث عن مواد خام بديلة لتواجه زيادة الطلب. وفى هذا السياق، يتوجب توسيع نطاق فوائد المواد الخام بصورة غير تقليدية، بحيث تشمل الأراضى والمياه التى يمكن استخدامها فى زراعة محاصيل «مزدوجة الفائدة» مثل

(*) البوشل: وحدة قياس أحجام. (المترجم)

الذرة وفول الصويا والقمح. وتوجد فى الولايات المتحدة وحول العالم مساحات شاسعة من الأراضى «غير الخصبة»، وهى أراض اختار المزارعون ألا يزرعوها لأنها لا يمكن أن تنتج غذاءً بأسعار السوق ولكن من الممكن زراعتها لإنتاج المواد الخام للوقود الحيوى.

والمستهلكون أيضًا يختارون أن يستخدموا أرضًا ومياهًا بطرق خاصة عندما يقررون أن يتناولوا مأكولات معينة. فالكيلوجرام من لحم الخنزير يحتاج تغذية مقدارها ثلاثة كيلوجرامات من الحبوب؛ وكل كيلوجرام من لحم البقر يحتاج ثمانية كيلوجرامات من الحبوب[٣٦]. والمشكلة التى يجب على المجتمعات البشرية أن تناقشها هى أية مواد غذائية تزرع وأين يكون ذلك.

والشعوب موزعة توزيعًا يختلف تمام الاختلاف عن توزيع الأراضى الصالحة للزراعة أو إنتاج الغذاء. ووفقًا للمعتقدات التقليدية السياسية والاقتصادية، فإن تلك الاختلافات فى المؤن المعروضة والطلب عليها يفترض أنها تعالَج بواسطة الشبكات العالمية للتجارة الحرة. وعندما تفشل الأسواق فإن الحكومات والمنظمات الدولية عادة ما تتدخل وتمنح «مساعدات». غير أن استخدام ثمار الأرض كمواد خام صناعية سوف يزيد من تعقد الاختيارات الخاصة بتوزيع الموارد ولا تستطيع إلا أن ترفع أسعار الغذاء، على الأقل على المدى القصير. وتخصيص المزيد من الأراضى لإنتاج الطعام والأعلاف يزيد من تعقيدات الأمور، واستغلال كميات متزايدة من الموارد الطبيعية غير المستغلة حاليًا سوف يكون لقاء ثمن باهظ.

واختيار السياسات لها تأثير واضح على الاستثمارات وآليات السوق المترتبة عليها. وقد ترتب على القرارات الحكومية الخاصة باستخدامات الإيثانول فى الولايات المتحدة أن القدرات الإنتاجية زادت على الحاجة. فما بين بدايات ٢٠٠٥ وأخريات ٢٠٠٧، زادت أعداد المصانع العاملة فى الولايات المتحدة بما يربو على ٥٠ بالمائة فوصل عددها إلى ١٣٠ مصنعًا، بينما تضاعفت أعداد المصانع تحت التشييد

أربعة أضعاف ووصلت إلى ٨٠ مصنعًا[٢٧]. وترتب على حجم الإيثانول الذى نزل الأسواق أن أسعاره انخفضت، مما أدى إلى انخفاض حديث فى الاستثمارات وخطط بناء مصانع جديدة. وبدوره سوف يؤدى فائض الإيثانول الموجود فى الأسواق إلى تراجع الضغوط الرامية إلى رفع أسعار الذرة، فى الوقت الحالى، ولكن المنافسة حول كل الحبوب سوف تُستأنَفُ فى نهاية المطاف مع الزيادة الحتمية فى الطلب على كلٍّ من الغذاء والوقود.

المرحلة الثانية: ظهور محاصيل مكرسة للطاقة، وأنواع وقود جديدة، وتكنولوجيات تصنيع جديدة، والجدل حول انبعاث الكربون من إنتاج الوقود الحيوى

إن ارتفاع المداخيل حول العالم سيظل يشكل عامل ضغط على أسعار السلع، مع استخدام المزيد من الحبوب لأغراض الغذاء والعلف. والمصادر الأساسية لتزويد ذلك الغذاء والعلف هى المياه والأراضى الصالحة للزراعة. ولهذا، ولكى نخفض من المنافسة بين الغذاء والوقود الحيوى على الموارد، وهو الأمر الذى سوف ينتهى بفصل أسعار الغذاء عن أسعار الوقود الحيوى، فإن منتجى الوقود الحيوى يتعين عليهم إيجاد محاصيل لاستخدامها كمواد لا تتنافس مباشرة مع الأراضى والمياه المخصصة لمحاصيل الغذاء الصالح للأكل.

وقد بدأت بالفعل زراعة محاصيل جديدة للطاقة فى العديد من البلدان حول العالم. وتجرى الصين والهند تجارب على مزارع كبيرة لنبات الجاتروفا، وهى شجيرة بذورها غنية بالزيوت وتنمو فى أحوال من الجفاف والتربة الضعيفة. وتحوى بذور الجاتروفا ٤٠ بالمائة زيوتًا ولابد من جمعها يدويًا، ثم يتم عصرها لاستخراج الزيوت، وبعد ذلك تُحول الزيوت إلى ديزل حيوى. ولا تختلف عمليات التصنيع والبنية التحتية اللازمة لذلك عن تلك التى يتطلبها زيت النخيل. ولما كان زيت الجاتروفا غير صالح للأكل وينمو فى تربة ضعيفة، فإنه بذلك يمثل مواد خام قد تخفف من القلق حول

التنافس مع الغذاء. ولما أدركت شركة «بريتيش بتروليوم» (BP) هذه الاحتمالات بادرت باستثمار ٩٠٠ مليون دولار مع شركة «دى-أى» للزيوت لإنتاج الديزل الحيوى من الجاتروفا[٣٨]. وتخطط الصين لزراعة ما يقرب من ١٣ مليون هكتار بحلول ٢٠٢٠[٣٩]. وخصصت الهند ١١ مليون هكتار على الأقل لزراعة الجاتروفا، وسط مناقشات علنية أن تصل المساحة إلى نحو ٣٢ مليون هكتار، وتخطط لاستخدام الديزل الناتج للاستهلاك المحلى والتصدير إلى أوربا[٤٠]. غير أنه لما كان عدد المزارع العاملة تجاريًا الموجودة حاليًا محدودًا، وبالتالى الخبرات محدودة فى المزارع الكبيرة وجمع المحصول منها، فليس واضحًا الدور الذى ستلعبه الجاتروفا فى الأسواق العالمية للوقود الحيوى.

وبالمثل، ثمة آمال عريضة معقودة على السليولوز كمادة خام لتصنيع الوقود الحيوى. وباختصار، عندما يتحد السليولوز والهميسليولوز مع مادة اللجنين تتكون المادة التركيبية الرئيسية التى تشكل دعامة النباتات الخضراء[٤١]. والسليولوز هو بوليمر بالغ الصلابة ويتكون من جزيئات سكرية مرتبطة معًا ارتباطًا وثيقًا، بينما الهميسليولوز له تركيبة مماثلة ولكنه أسهل فى التكسر. والجنين بوليمر قاعدى غير سكرى. وفى حين نجد أن محاصيل مثل الذرة أو القمح تُزرَعُ فى الوقت الحالى طلبًا لحبوبها لأغراض الغذاء والأعلاف والمواد الخام الصناعية، إلا أن تلك الحبوب لا تشكل إلا جزءًا صغيرًا من النبات. ويشكل السليولوز والهميسليولوز ٥٠ إلى ٨٥ بالمائة من كتلة النبات حسب نوع النبات، كما يكون اللجنين١٠ إلى ٢٥ بالمائة من كتلة النبات. وعلى ذلك، فإن كان من الممكن للسكريات التى تشمل السليولوز أن تعمل كمادة خام للتخمر، فإن سيقان الذرة والقمح، وكذلك النفايات والجانب الأعظم من النباتات الأخرى والأشجار المزروعة خصيصًا لهذا الغرض، قد تصلح كمصدر رئيسى للوقود السائل.

وهناك طرق صناعية مباشرة لتحويل السليولوز والكتل البيولوجية الأخرى مباشرة إلى وقود سائل. فتحت درجات حرارة مرتفعة، وفى غياب الأكسجين تتحلل

المواد العضوية إلى مكونات أبسط مكونةً «الغاز التخليق». ويمكن الوصول إلى نتيجة مماثلة بالمعالجة بالأحماض أو بالبخار. وفى وجود المحفز الكيميائى المناسب والسيطرة الدقيقة على الخطوات، من الممكن إعادة اتحاد الغاز التخليقى فينتج منه الإيثانول ومركبات أخرى. وهذه التكنولوجيا قديمة نسبيًا، وتعود إلى نهايات القرن التاسع عشر، غير أنه بسبب التكاليف المرتفعة للطاقة اللازمة للتحلل الحرارى والكيمياء المعقدة لكلٍّ من التحلل والتخليق التحفيزى، فقد كان هذا التوجه حتى فترة قريبة أكثر تكلفةً من أن يُستخدم فى صناعة الوقود السائل.

وبخلاف الإيثانول، هناك اهتمام متنامٍ فى الوقت الراهن بالبيوتانول كوقود للنقل. ونظرًا للاستخدام الواسع النطاق للبيوتانول كمادة مذيبة فقد كانت عملية تصنيعه تحت ضغوط مستمرة لتخفيض تكاليفه طوال السنوات الخمس والسبعين الماضية. غير أن عملية التصنيع الحالية تنتج منتجًا أغلى من الجازولين (البنزين) فى الولايات المتحدة بنحو ٢٠ بالمائة. وبالتالى ثمة جهود كبيرة تُبذل فى سبيل تطوير طرق بيولوجية لإنتاج البيوتانول. والبيوتانول له ميزات مادية على الإيثانول منها حصيلة أعلى من الطاقة لكل وحدة حجم وانجذاب للماء أقل بكثير.

والبيوتانول هو وقود «قديم» للنقل؛ فقد كان مزارعو الولايات المتحدة ينتجونه فى أوائل القرن العشرين لاستخدامه فى الجرارات الزراعية. ومثلما يخمر نبات الخميرة السكريات إلى إيثانول، تخمر جرثومة «كلوستريديوم أسيتوبيوتيليكوم» (Clostridium acetobutylicum) السكريات إلى مزيج من الأسيتون والبيوتانول والإيثانول. وهذه الجراثيم تنتج طبيعيًا نسبة منخفضة من البيوتانول. ولكن المزايا الفيزيائية النسبية للبيوتانول على الإيثانول لم تغب عن انتباه منتجى الوقود الحيوى اليوم.

وفى ٢٠٠٧ تخطط شركتا (BP) وديبونت لبدء إنتاج البيوتانول وبوصفه جزء من توليفة وقود فى المملكة المتحدة بحلول ٢٠٠٩[٤٢]. وسوف يبدأ هذان العملاقان الصناعيان، ومعهما شركة السكر البريطانية، بإنتاج مبدئى يبلغ نحو ٣٥ مليون لتر سنويا من

بنجر السكر باستخدام التكنولوجيات المتاحة. كما تخطط الشركتان لاستثمار ٤٠٠ مليون دولار فى بناء مصنع تبلغ سعته ٤٢٠ مليون لتر فى المملكة المتحدة، مقدر له أن يبدأ العمل فى ٢٠١٠. وسيبدأ المصنع بإنتاج الإيثانول من القمح ثم يتحول إلى إنتاج البيوتانول مع إدخال «الجيل الثانى من المحفز البيولوجى» - وهو جرثومة معدلة - لإنتاج البيوتانول بحصيلة أكبر. وتتوقع ديبونت أن تقدم هذه الجرثومة فى ٢٠١٠، مما سيترتب عليه إنتاج بيوتانول يصل ثمنه إلى ٣٠-٤٠ دولارًا للبرميل، كما تتوقع فى تلك الآونة أيضًا أن تبدأ فى تسويق البيوتانول فى الولايات المتحدة[٤٣].

وسوف يفيد إنتاج الوقود الحيوى أيضًا من استخدام الإنزيمات التى تساعد على تفكيك السليولوز والنشاء. ويمكن استخلاص هذه الإنزيمات من الجراثيم التى تعيش فى أمعاء النمل الأبيض أو من الجراثيم التى تعيش داخل الحيوانات المجترة. وبوسع الإنزيمات أن تلغى خطوة 'الطبخ' فى تصنيع المواد الخام ذات المحتوى العالى من النشاء، بالهضم المباشر للنشاء الحبيبى أو غير المطبوخ لتكوين سكريات قابلة للتخمر، أو بأن تساعد فى إسالة المواد الصلبة فى الذرة، أو بالمساعدة فى تنظيف أمزجة الزيوت النباتية وتحويلها إلى ديزل حيوى. وثمة تعاون بين شركتى فيرينيوم وسينجنتا المتخصصة فى التكنولوجيات البيولوجية الزراعية لإجراء تعديل جينى للذرة لإنتاج إنزيم آخر هو أميليز-ت (Amylase-T) الذى يهضم النشاء ويحوله إلى سكريات داخل نبات الذرة أثناء نموه، مما يخفض تخفيضًا كبيرًا فى الطاقة والتكاليف فى الخطوات التالية فى الصناعة. وبدءًا من منتصف ٢٠٠٩، سوف تنتظر الشركات المتعاونة صدور الموافقة من وزارة الزراعة الأمريكية على بدء التجارب الحقلية. وتعمل شركات جننكور وفيرينيوم ونوفوزيمز وعدد آخر من الشركات على تطوير إنزيم السليوليز (cellulase enzyme) الذى يساعد على تفكيك السليولوز.

ولكى تساعد على تسويق الإيثانول السليولوزى، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية فى أوائل ٢٠٠٧ عن تمويل حكومى لبناء ستة معامل تكرير تجريبية[٤٤]. وهذا التمويل الحكومى، الذى يبلغ ٣٨٥ مليون دولار، مقصود به حث القطاع الخاص على المساهمة

بأموال طائلة بحيث يصل إجمالى الاستثمارات إلى ١٫٢ بليون دولار. وباستخدام تجميعات مختلفة من المعالجة بالأحماض والبخار والإنزيمات والتخمير، يُنتظر أن يصل إنتاج المصانع التجريبية إلى ١٣٠ مليون جالون من الإيثانول سنويًا من الأخشاب وفضلات الحظائر وحطب الذرة (السيقان المتبقية) وقش القمح وغير ذلك من المواد الخام.

وقد يتمخض عن تلك التقنيات تخفيض تكلفة تحويل الذرة إلى إيثانول، ولكن تلك الإستراتيجية لا تتعامل إلا مع جانب ضئيل من المشكلة الآتية: فغالبية تكلفة الوقود الحيوى (٧٥-٩٠ بالمائة) تقع فى المواد الخام. والوقود هو سلعة، واحتمالات النجاح يومًا فى تخفيض تكلفة الإيثانول السليولوزى إلى النصف هى احتمالات ضئيلة للغاية إن لم تكن معدومة كليةً. وما دامت الذرة، أو أى محصول يُزرَعُ فى أراض يمكن استخدامها فى زراعة الذرة، تُستخدم كأعلاف، فإن هامش الربح من الوقود الناتج سوف تقع عليه ضغوط من أسفل من جراء أسعار الغذاء ومن أعلى من جراء كلٍّ من أسعار البترول وموردى الإيثانول المنافسين.

ثمة مشكلتان أخيرتان تكتنفان سياسة الاعتماد على الإيثانول السليولوزى كوقود. أولاهما، أنه لا توجد وسيلة حالية فى الولايات المتحدة لجمع كميات كبيرة من حطب الذرة أو سيقان القمح أو أية كتل بيولوجية من الحقول ونقلها إلى أماكن التصنيع. وإذا استثنينا ظروفًا محدودة، حيث تتجمع فضلات مصانع الأخشاب أو ساحات تجميع الفضلات التابعة للبلديات فى أماكن محددة، فإن الأمر سوف يتطلب استثمارات هائلة لبناء وسائل وبنية تحتية للنقل وصيانتها.

وثانيتهما، أنه فى حين توجد تقديرات لأداء التكنولوجيات المختلفة الخاصة بمعالجة السليولوز، إلا أن أيًا منها لم تعمل حتى الآن على نطاق واسع. وذلك يعنى انعدام اليقين ليس فقط بخصوص إجمالى الناتج من أى مصنع بعينه، وإنما أيضًا (١) فيما يتعلق بالعدد الإجمالى للمصانع اللازمة لإنتاج كميات معينة من الوقود، (٢) الحجم الإجمالى للمواد الخام والكمية الإجمالية للطاقة اللازمة لتشغيل تلك المصانع،

(٣) التكلفة الإجمالية للبنية التحتية لحصاد ونقل تلك المواد الخام. والنقطة الأخيرة هى مشكلة على وجه الخصوص، لأنه فى الوقت الذى تعتمد فيه تكاليف النقل خطيًا على المسافة التى يتعين على المواد الخام والوقود المُصنَّع أن تقطعها، فإن الحجم الإجمالى للمواد الخام يعتمد على «المساحة» التى يتم حصادها وبالتالى على «مربع» المسافة التى يتعين على المواد الخام أن تقطعها. وعلى ذلك، نجد أن تغيرات بسيطة فى تكلفة النقل قد تكون لها تأثيرات كبيرة على حجم المواد الخام التى يمكن تصنيعها اقتصاديًا.

وهناك حافز جوهرى لزيادة إنتاج الوقود الحيوى وهو تخفيض انبعاث الغازات من تأثيرات الدفيئة التى يتسبب فيها حاليًا إحراق الوقود الأحفورى (البترول). وسوف يحتاج إنتاج كميات كبيرة من الوقود الحيوى إلى مصادر كبيرة للكتلة البيولوجية. ومن البدهى أن اختيار المحصول يرتبط بالمكان الذى سوف تتم فيه زراعته، وكيفية تصنيعه، وما المسافة التى سوف يسافرها الوقود الناتج كى يصل إلى المستهلكين.

ويزداد الأمر تعقيدًا عندما يتم إدخال إجمالى كميات الكربون المنبعث من الزراعة فى هذه الحسابات. ويبلغ المحتوى الإجمالى للتربة من الكربون عدة أضعاف نسبته فى الجو. وبالإضافة إلى الانبعاثات من تشغيل ماكينات المزارع باستخدام وقود الإيدروكربون، نجد أن جزءًا لا يستهان به من انبعاث الكربون من الممارسات الزراعية التقليدية يأتى من الزرع والحصاد. ومجرد تقليب التربة سنويًا يطلق فى الجو كميات كبيرة من الكربون، لأنه يفتت تركيبات الجذور ويدمر النظام الإيكولوجى تحت الأرض والمكون من جراثيم وفطريات. وثمة جهد بُذِل لإدماج قياسات الكربون فى التربة فى نموذج زراعى لشمال وسط الولايات المتحدة توصل إلى أن محتوى الكربون العضوى للتربة قد تناقص بنحو ٢٠ بالمائة منذ أن دخلت الزراعة المنطقة فى نحو سنة ١٨٥٠.[٤٥]

وعدم تقليب التربة يؤدى إلى تجمع الكتلة البيولوجية بمرور الوقت. والتحول إلى الطرق التى لا تشمل حرثًا للأرض، وهى ما يُطلق عليه «الزراعة-دون-حرث»، أو الإقلال من الحرث (الحرث التحفظى)، ينتج عنها انخفاض ملحوظ فى إجمالى الكربون الذى ينبعث من الزراعة ومن ثم من إنتاج الوقود الحيوى[٤٦].

وسواء كانت مزروعة بطريقة «الزراعة - دون - حرث» أو بالطرق التقليدية، فإن المحاصيل المعدلة جينيًا والتى تتسم بمحصول وفير ستكون على الأرجح مواد خام مهمة للوقود الحيوى، الأمر الذى سوف يثير مجموعة من المشاكل مختلفة تمام الاختلاف. فقد يحدث تسرب للجينات من المحاصيل المعدلة جينيًا إلى أقربائها من محاصيل غير معدلة مما يشكل تهديدًا محتملاً إذا ما انتقلت الجينات المقاومة لمبيدات الأعشاب إلى أعشاب. وقد لوحظ تدفق الجينات إلى أقرباء لصيقين فى مزارع تجريبية فى كنتاكى خاصة عشب «الكلأته المرجية» (bluegrass) وعشب 'المرجية النجيلية' (bentgrass)، مما يعطى "أول برهان على تسرب «الجينات العابرة» (trans-genes) - إلى تجمعات النباتات البرية فى الولايات المتحدة"[٤٧]. وقد تم الآن إثبات نتيجة مماثلة لانتقال ثابت ومتواصل لجينٍ مقاومٍ لمبيدات الأعشاب من نجيلة شائعة زراعتها هى «براسيكا نابوس» (Brassica napus) والاسم الشائع لها هو بزر اللفت (أو الشلجم)، إلى قريبتها البرية «براسيكا رابا» (Brassica rapa)[٤٨]. ومن السهولة بمكان داخل المعامل نقل الجينات المقاومة للأعشاب عن طريق تبادل حبوب اللقاح بين الأنواع الشائعة للنجيل[٤٩]. وقد تؤدى هذه البراهين إلى وقفة عند صانعى السياسة والمصالح التجارية. فإن أى انتقال جينى فى الزراعة المكشوفة قد ينتج عنه انتشار غير مقصود لسلالة جديدة من الأعشاب المقاومة لمبيدات الأعشاب مع احتمالات التسبب فى أضرار اقتصادية هائلة ودمار مادى جسيم.

وتثير التهديدات المحتملة للأنظمة الزراعية تساؤلات مهمة حول الحكمة فى الاعتماد على محاصيل معدلة جينيًا فى إنتاج المواد الخام. كما أن ثمة احتمالات حقيقية لصدور تشريعات حكومية أكبر لتحجيم زراعة المحاصيل المعدلة جينيًا، أو على

الأقل تطبيقات أكثر صرامة للتشريعات الحالية، إذا اعتبرنا الحكم الصادر فى شأن «الألفالفا» المعدلة جينيًا مؤشرًا للأحداث المستقبلية.

وعلى الرغم من الترحيب النسبى لأسواق الولايات المتحدة للمحاصيل المعدلة جينيًا، فإنه ليس واضحًا ما إذا كان ذلك التوجه سوف يستمر. وقد تواجه محاصيل الطاقة، التى تعدلت لرفع معدلات نموها أو لتسهيل تصنيع السليولوز والمكونات الأخرى، قد تواجه مقاومة مبنية على خطر انتقال مثل تلك السمات إلى النباتات والأشجار البرية.

وهناك مصدر للمواد الخام أقل إثارة للجدل وهو الكلأ غير المعدل جينيًا. ويجادل دافيد تيلمان، وهو عالم بيئة بجامعة منيسوتا، وزملاؤه بأن الأراضى المعشبة المعمرة المحلية يمكن استخدامها كمصدر للكتلة الحيوية لإنتاج الوقود السائل. وتشمل الإستراتيجية أساسًا إعادة المراعى الطبيعية إلى طبيعتها الأصلية وجز الكلأ الناتج مرة واحدة فى السنة لحصد الكتلة الحيوية. والأهم من ذلك، حتى مع استخدام التقنيات الصناعية المتاحة، أن الحصيلة الإجمالية لدورة حياة ذلك الوقود قد يكون سلبيًا من ناحية الكربون، بمعنى أنه قد يختزن من الكربون ما هو أكثر مما ينبعث منه أثناء الحصاد والتصنيع والاستخدام كوقود.

وفى خلال تجربة استغرقت عقدًا كاملاً من السنين، زرع تيلمان ومعاونوه تجميعات من ثمانية عشر نوعًا محليًا مختلفًا فى "تربة بالغة التدهور وقاحلة غير مخصبة". ويبدو أن التجربة، التى جرت باستخدام الحصاد اليدوى فى مساحات تجريبية صغيرة، قد أثبتت أن محصول الكتلة الحيوية فى أنظمة بيئية مختلفة تزيد على تلك المزروعة أحاديا(*) أو فى أنظمة بيئية أقل تباينًا(٥٠). ومع نضج التجارب زادت الكتلة الحيوية التى حُصِدت وكذلك زادت نسبة الكربون تحت التربة.

(*) الزراعة الأحادية الاكتفاء بزراعة محصول واحد وعدم استغلال الأرض بأية طريقة أخرى. (المترجم)

وفى داخل أنحاء الولايات المتحدة كثيراً ما تُقتَرَحُ عدة أنواع من النجيل للزراعة الأحادية على نطاق واسع كمواد خام للوقود الحيوى. وعشب «سويتشجراس» (Switchgrass) هو مثال لذلك. غير أن تيلمان ومساعديه يؤكدون أنه على الرغم من أن سويتشجراس قد يكون عالى الإنتاجية فى التربة الخصبة، أى تلك المستخدمة لزراعة الغذاء، إلا أن الزراعة الأحادية له فى تربة غير خصبة لا تعطى إلا نحو ثلث ما تُغِله فى الأراضى المعشبة[٥١].

ويتناقض ذلك تناقضًا كبيراً مع دراسة استغرقت خمس سنوات أجراها مارتى شمير وزملاؤه فى جامعة نبراسكا. فقد أجروا «تجارب حقلية بحجم مزرعة» للسويتشجراس، الذى زرعوه على «أراض هامشية للمحاصيل» فى عشر مزارع وحصدوه مستخدمين تجهيزات تقليدية لجمع التبن. ويؤكد الباحثون أن طرقهم تنتج ما يقرب من ضعف كمية الإيثانول لكل هكتار من المراعى وما يقرب من ستة أمثال ما أنتجته تجارب السويتشجراس الأخرى[٥٢]. ومما هو جدير بالذكر أن شمير وزملاءه قد وجدوا أنه باستخدام الحصاد على مستوى حجم مزرعة فإن العائد الزراعى الحقيقى - ويشمل وقود الديزل والسماد ومبيدات الحشائش - كانت أقل بما يقارب ٦٥ بالمائة عن التقديرات السابقة المبنية على تجارب أُجريت على نطاق صغير.

وهناك عشب آخر هو «ميسكانثوس إكس جيجانتيوس:(Miscanthus x gigan teus) كثيراً ما يوصف بأنه مادة سليولوزية خام. ويُطلق عليه أيضًا «ميسكانثوس العملاق»، وهو هجين عاقر يتكاثر بزرع عُقَلِ الجذور المأخوذة من النبات. وفى أول مقارنة مباشرة بين «ميسكانثوس إكس جيجانتيوس» والسويتشجراس المزروع على أراض زراعية من أجود الأنواع فى ولاية إلينوى، بدءًا من عام ٢٠٠٢، أنتج الميسكانثوس ضعف الكتلة الحيوية لما أنتجه السويتشجراس لكل مساحة أرض[٥٣]. والميسكانثوس ليس من النباتات المحلية لشمال أمريكا، مما قد يثير قلقًا حول احتمالات انتشاره كعشب، ولكن

مؤيدى الميسكانثوس كمادة خام للوقود الحيوى يحاجون بأنه لم يتحول إلى حالة غازية طوال ما يربو على عقدين من زراعته فى محطة تجارب فى الدنمارك(٥٤).

وفى ضوء كل تلك الآراء يبدو أن زراعة النجيل على نطاق واسع تحمل احتمالات حقيقية، مع التحذير أننا لا نستطيع أن نقدم أفضل من تقدير للكمية الإجمالية من أى وقود حيوى يمكن صنعه من أى محصول. ويقدر تشارلز ويمان من جامعة كاليفورنيا ريفرسايد أنه "بإنتاج يبلغ ٥-١٥ طنًا جافًا لكل فدان سنويًا، وهو أمر ممكن بالنسبة لشجر الحور والسويتشجراسس والميسيكانثوس، يمكن للولايات المتحدة أن تحل الإيثانول محل كامل استهلاكها من البنزين، مستخدمة فى ذلك ٢٠٠ مليون فدان من الأراضى، تشكل نحو ٢٠ بالمائة من مجموع الأراضى المخصصة للمحاصيل والرعى والمراعى(٥٥).

ومع ذلك، فإن تواصل الجدل حول ما أفضل مادة خام لزراعة كتلة حيوية، وبأية تكلفة، يسهم فى التأكيد على أهمية المرحلة المبكرة مرحلة المعرفة والتخطيط. ودراسة توابع التوسع فى إنتاج الطاقة الحيوية على انبعاث الكربون، على وجه الخصوص، لا تزال فى المراحل المبكرة للبحث. وأول دراسات شاملة، نُشرت فى مجلة «ساينس» فى أوائل ٢٠٠٨، ليست مشجعة. ووصل مؤلفو إحدى المقالات إلى أن تحويل الغابات الفطرية والأراضى العشبية فى البرازيل وجنوب شرق آسيا والولايات المتحدة إلى زراعة المواد الخام للوقود الحيوى سوف يطلق "١٧ - ٤٢٠ ضعفًا إضافيًا من ثانى أكسيد الربون أكثر من التخفيض السنوى لتأثيرات الدفيئة (البيت الزجاجى) التى سوف تحدث من جراء إحلال الوقود الحيوى محل الوقود الأحفورى"(٥٦).وبالمثل، "إذا تم تحويل حقول الذرة الأمريكية ذات المحصول المتوسط إلى زراعة السويتشجراس لإنتاج الإيثانول، فإن التخلى عن الذرة سوف يطلق انبعاثات من تغير استخدام الأرض يستغرق التخلص منها ٥٢ سنة، وسوف ترتفع الانبعاثات بما يعادل ٥٠ بالمائة على مدى ٣٠ سنة"(٥٧).

أفرزت هذه النتائج نقاشًا تنامى على مدى عدة أشهر على صفحات مجلة «ساينس» وغيرها من المجلات، شارك فيه أكاديميون مختلفون وعلماء حكوميون ورأسماليون مغامرون. وكان رد الفعل «الرسمى» لعدد من المعامل الحكومية هو أن تشكك فى تلك الفرضيات والمناهج المستخدمة ودوافع مؤلفى المقالات: "إن (المقالتين)، اللتين تناقلتهما الصحف، تثيران قضايا مهمة ولكنها تبدو أحيانًا كأنها استنتاجات تبحث عن منطق كامن. وهاتان الدراستان قد أساءتا فى الأساس فهم القوى المحلية التى تقف خلف قضية تغير استخدام الأراضى، ولا تضع فى اعتبارها أية تأثيرات مخففة مثل تباطؤ التحضر (التحول من الريف إلى الحضر) الذى سوف يأتى به مجتمع زراعى مفعم بالحياة"[٥٨].

ومن الجلى أن الجدل سوف يستمر فى المستقبل المنظور. ومن السابق لأوانه أن نقدم حكمًا نهائيًا حاسمًا على أى توجه معين أو أية دراسة بعينها. شىء واحد مؤكد هو أنه إذا ما أردنا أن نصدر قرارات عقلانية، فنحن نحتاج إلى فهم أعمق كثيرًا للطاقة والكربون والتوازن الغذائى لمحاصيل الكتلة الحيوية المختلفة عندما تُستَخدَمُ لإنتاج الطاقة أو المواد. وهذا الاعتبار يعود بنا إلى مقدمة قضية الاختيارات والسياسة العامة فى تحديد الاستخدامات المستقبلية للبيولوجيا بوصفها تكنولوجيا. وفى هذه الحالة، فإن الوصول إلى أقصى ما يمكن أن تصل إليه حصيلة الكتلة الحيوية وحجم الوقود الحيوى الناتج ليست بالضرورة مماثلة للوصول إلى الحد الأقصى فى الأمن والسلامة المادية والاقتصادية.

إن التأثيرات المثيرة للتغيرات المناخية تحجب كل العوامل الأخرى المتحكمة فى استخدام الأنواع المختلفة من الأراضى لزراعة أنواع مختلفة من المحاصيل وتفرض ما يمكن زراعته وأين. ويضاف إلى ذلك أن المساحة الإجمالية للأراضى المتاحة للإنتاج مرتفع الحصيلة للغذاء ليست أمرًا ثابتًا على مر الزمن؛ ووفقًا لما قالته صحيفة «الإيكونوميست»، "تقول بعض القياسات إن الانحباس الحرارى العالمى يمكن أن يقلل الإنتاج الزراعى العالمى بمقدار السدس بحلول سنة ٢٠٢٠"[٥٩].

المرحلة الثالثة: إنتاج الوقود باستخدام الجراثيم المهندَسة

مع استمرار كون إنتاج المواد الخام على نطاق واسع عرضة لمناورات السوق والقواعد المنظمة، فإن من المرجح أن البنية التحتية لتحويل تلك المواد الخام إلى وقود سوف تتغير بصورة مثيرة. فعلى مدار السنوات الخمس أو العشر القادمة، سوف تبدأ تقنيات بيولوجية جديدة لإنتاج الوقود الحيوى فى النزول إلى الأسواق.

وسوف يتحول تخمير السكريات لإنتاج الإيثانول والبيوتانول إلى حلول قصيرة المدى. وسوف تحل سريعًا محل استراتيجية تحسين خطوات إنتاج الوقود الحيوى فى الكائنات الموجودة حاليًا كائنات جديدة معدلة بالهندسة الأيضية والبيولوجيا التخليقية، التى سوف تحول المواد الخام مباشرة إلى وقود نقل مماثل للبنزين. ولقد انتقلت بالفعل تطبيقات تلك التقنيات فى التكنولوجيا البيولوجية الصناعية من مرحلة البحث الأكاديمى إلى مرحلة التسويق.

وتسعى شركة «أميريس للتكنولوجيا البيولوجية» إلى إنتاج ديزل حيوى ووقود عام للطيران يمكن مقارنته بالوقود «جت-أ». وتأمل الشركة أن ذلك الوقود سوف ينافس الوقود الأحفورى لقاء سعر منخفض يبلغ ٤٥ دولارًا للبرميل بحلول ٢٠١١[٦٠]. وإذا ما حققت الشركة هذا الهدف فسوف تنفتح أسواق تصل إلى ٣,٢ بلايين جالون سنويًا - ويخطط سلاح الطيران الأمريكى لإحلال وقود تخليقى محل وقوده المستخرج من البترول والمسمى «ج ب-٨» بحلول ٢٠١٠[٦١]. وتؤكد شركة أميريس أن وقودها الحيوى له من السمات الفيزيائية (مثل كثافة الطاقة وضغط الغاز ونقطة الغيم) ما يطابقه مع الوقود المستخرج من البترول أو يتفوق عليه[٦٢].

وفى هذا القطاع، وهو قطاع صار تنافسيًا بالفعل، نجد أن تفاصيل تطوير المنتَج ومتطلبات المواد الخام مرتبطة ارتباطًا وثيقًا. غير أن عدد المشاركين الذين يخططون لإنتاج الوقود فى الجراثيم والخميرة والطحالب يشير إلى أشياء مثيرة تتناول تكاليف

البدء فى المشروع مع الدخول فيما أصبح الآن مجالاً شديد التنافسية، وتسيطر عليه مؤسسات تملك بلايين عديدة من الدولارات وكلها مؤسسات متعددة الجنسيات. وتقترح البيولوجيا احتمالات إنتاج وقود بحجم كبير، مع احتمالات ألا يكون مصحوبًا بتكاليف البنية التحتية التى تتسم بها صناعة البترول التقليدية. ونستطيع أن نتوقع فيضًا من المشاريع والشركات الجديدة، كلها تخضع لهذه الخطوط العامة. وإذا ما افترضنا أن هذه الشركات سوف تحقق النجاح فالأمر يستحق أن نتدارس فى التأثيرات الناتجة على أسواق الوقود السائل، والتأثيرات على أوضاع الاقتصاد بصورة عامة.

تختلف الاعتبارات الاقتصادية لتصعيد الإنتاج الجرثومى المباشر للوقود الحيوى اختلافًا جذريًا وجوهريًا عن الاعتبارات التقليدية المتعلقة بإنتاج البترول وتكريره. فالتكاليف الخاصة بالعثور على حقل جديد للبترول والوصول به إلى أقصى طاقته الإنتاجية تكاليف هائلة ولكنها متغيرة حسب الموقع والنوعية واستقرار الحكومات المحلية، بحيث تشكل مقياسًا ضعيفًا لمتوسط الاستثمارات المطلوبة. بيد أن ثمة مقياسًا مباشرًا وصريحًا لتكاليف زيادة كميات الديزل والبنزين وهو التكلفة الجانبية للتكرير، إضافة إلى خمس سنوات أو نحو ذلك لبناء المصانع والوصول بها إلى أقصى إنتاجيتها. وقد أعلنت شركة شل مؤخرًا عن استثمار ٧ بليون دولار لرفع طاقة معمل التكرير الموجود فى بورت آرثر لما هو أكثر من ضعف طاقته[٦٣]. وسوف تضيف هذه التوسعات ٣٢٥,٠٠٠ برميل يوميًا بالإضافة إلى الطاقة الحالية للمعمل وهى ٢٨٥,٠٠٠ برميل يوميًا، أو نحو ٥٢ مليون لتر يوميًا مقابل تكلفة رأسمالية قدرها ١٣٠ دولارًا لكل لتر يوميًا. ومن الطبيعى أن هذا المبلغ سوف يُستهلك أقساطًا على مدى عمر المصنع الذى ربما يبلغ عقودًا.

وفى الحقيقة، هذا مبلغ متواضع إذا ما قورن بالاستثمارات المطلوبة لإنتاج الإيثانول باستخدام التقنيات *الحالية*. ويمكن أن تصل تكلفة المصانع المصممة لإنتاج الإيثانول بطرق التخمير والتقطير التقليدية، على شاكلة المصنع الجديد الذى أعلنت عنه

بريتيش بتروليوم وديبونت، إلى ٤٠٠ مليون دولار بطاقة إنتاجية مقدارها ٤٢٠ مليون لتر سنويًا أو أكثر قليلاً من ١ مليون لتر يوميًا(٦٤). ويصل ذلك بتكلفة اللتر إلى نحو ٤٠٠ دولار يوميًا، أى ما يقرب من ثلاثة أضعاف توسعات مصنع تكرير شركة شل. ولكى تتمكن الشركة من دفع التكاليف طوال مدة حياة المصنع فإن ذلك يتطلب أن تبقى تكاليف إنتاج الإيثانول منخفضة بينما تبقى أسعار الإيثانول مرتفعة. غير أنه إن حدث أن الطلب على الحبوب استمر مرتفعًا، وإن استمرت كميات الإيثانول أكبر من طلب السوق، فليس واضحًا ما إذا كان الوقود الحيوى الذى يحتاج إلى مثل هذا الحجم الهائل للبنية التحتية يستطيع بسهولة أن يتنافس مع منتجات البترول. والانتقال إلى الوقود الحيوى الذى يحتاج طاقة أقل وبنية تحتية أقل حجمًا قد يُحْدِثُ تغييرات مثيرة فى اقتصادات إنتاج الوقود.

وعلى النقيض من التكاليف الرأسمالية الباهظة للتخمير التقليدى للإيثانول، نجد أن التكلفة الإضافية لمضاعفة الإنتاج الجرثومى المباشر للوقود الحيوى فى المستقبل قد يكون أكثر تماثلاً مع تلك التى نجدها فى إنشاء مصنع للجعة، أو فى أسوأ الحالات، منشأة لزراعة الخلايا على مستوى صيدلانى. وتصل التكلفة فى هذه الحالة إلى ما بين ١٠,٠٠٠ و١٠٠ مليون دولار، حسب الحجم والتعقيد المطلوب. وتثبيت التكلفة المستقبلية الصحيحة لمنشأة جرثومية لإنتاج الوقود الحيوى هو فى الآونة الحاضرة مجرد تدريب على التخمين البارع. غير أنه من المرجح أن التكلفة سوف تكون بصورة أو بأخرى أقرب إلى الحد الأدنى فى النطاق الذى ذكرناه آنفًا وذلك لأسباب فيزيائية واقتصادية.

فعلى سبيل المثال، من المرجح أن البيوتانول سوف يظهر فى المستقبل القريب كبديل للإيثانول لأسباب فيزيائية واقتصادية. ويحتاج البيوتانول إلى طاقة أقل من احتياج الإيثانول لكى يتم فصله عن الماء. وفى الحقيقة، فإن البيوتانول يبدأ فى الانفصال تلقائيًا عن الماء إذا زاد تركيزه على نحو ٨ بالمائة، مع ظهور كميات إضافية تتجمع فوق المرحلة السائلة. وعلى الرغم من أن ذلك التركيز سام لأنواع جرثومة

الكلوستريديوم الموجودة طبيعيًا، فإن جهودًا تجرى لبناء (أو تطوير) جرثومة تستطيع العيش تحت تلك الظروف. وتتبعًا لهذا الاتجاه البحثى، تمكن جيمس لياو ورفاقه من جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس (UCLA) من بناء مسار لتخليق البيوتانول فى جرثومة الإشكريشة القولونية يعمل بنسبة ٨٠ بالمائة من الحد الأقصى النظرى للجراثيم التى تنمو على السكريات[٦٥]. ويمكن لهذه الجرثومة فى النهاية أن تسمح بالإنتاج بالتخمير وفيه يُضخ البيوتانول ببساطة أو يُقشد من على سطح الصهريج فى عملية مستمرة. والتخفيض الناتج فى استهلاك الطاقة قد يشكل تحسنًا هائلاً فى التكاليف.

وسوف تزداد التكاليف انخفاضًا مع انتقال الإنتاج من الوقود الحيوى الكحولى إلى الوقود الحيوى الإيدروكربونى، الشبيه بالبنزين، وهو يمتزج امتزاجًا تامًا بالماء. والجراثيم التى تنتج الإيدروكربونات التى تطفو فوق سطح الماء سوف تخفض بصورة كبيرة تكاليف اللمسات الأخيرة فى إنتاج الوقود. والمقياس التدرجى الذى يحتاجه التكرير لن يصلح كميزة اقتصادية لأولئك الذين يملكون تلك البنية التحتية ولا كحاجز فى وجه الذين يأملون أن يدخلوا السوق. وإضافة لذلك، تتم صناعة الجعة فى الوقت الحالى بمقاييس تتراوح بين تعبئة الزجاجات فى جراجات يعبئون فيها لترات قليلة وعمليات تجارية تدير مُخَمِّرات تصنع عدة ملايين من اللترات سنويًا. وبهذا، فإنه بمجرد الحصول على السلالة ذات الصلة من الجراثيم، فإن زيادة إنتاج الوقود الحيوى قد تكون ممكنة على عدة مقاييس، وبهذا تستطيع أن تجعل المعروض يتماشى مع تغيرات الطلب. وبسبب هذه المرونة ليس ثمة حد أدنى على المقياس الذى عنده يصير إنتاج الوقود الحيوى مفيدًا تقنيًا واقتصاديًا.

إن قابلية الإنتاج الجرثومى للوقود الحيوى للتصعيد التدرجى تعتمد جزئيًا على المواد المستخدمة كمواد خام، ومن أين تأتى هذه المواد، وكيف يتم توصيلها إلى موقع الإنتاج. وتشكل منتجات البترول مواد خام أولية فى اقتصاد اليوم، سواء كمادة خام

للتصنيع أو للطاقة التى تحويها. ويحمل الإنتاج الحيوى بين ثناياه احتمالات أن يحل محل العديد من استخدامات البترول ويوفر الوقود والمواد من نطاق بالغ الاتساع من المواد الخام، منها السليولوز ومصادر أخرى لفضلات أفنية الحظائر والصرف الصحى المتاحة على مستوى البلديات. وفى نهاية المطاف، سوف تتعزز مسارات الإنتاج البيولوجى بإضافة مسارات التمثيل الضوئى، مما يوفر دعمًا شمسيًا لعملية التدوير. وسوف يوفر تحويل فضلات البلديات إلى وقود حيوى سائل سلعة ثمينة ومهمة فى مناطق كثيفة السكان، حيث يكون الاحتياج إليها أشد ما يكون. وبذلك من الممكن أن يصبح الإنتاج الجرثومى للوقود الحيوى باكورة تطبيقات التصنيع البيولوجى الموزَّع(٦٦). ويومًا من الأيام، فى القريب العاجل، سيكون هناك احتمال حقيقى أن تمون سيارتك بوقود حيوى تم إنتاجه بالقرب من منزلك.

التصنيع البيولوجى الموزَّع

على الرغم من أن وقود النقل هو هدف أولى مبكر لتسويق البيولوجيا التخليقية والهندسة الأيضية، فإنه فى النهاية سيصبح فى الإمكان التعامل مع الكتلة الحيوية بوصفها مادة خامًا للجراثيم المنتجة لما هو أكثر من الوقود. وقد بَنَتْ شركتا ديبونت وجننكور كائنًا يحول النشاء إلى بروبانديول (propanediol)، ثم تتم بلمرته بعملية صناعية إلى خيط يسمى «سورونا»، يتنافس الآن بنجاح فى الأسواق ضد اللدائن المشتقة من البترول. ويأتى النجاح التنافسى للسورونا من إدماج العمليات البنائية البيولوجية فى عملية التصنيع، مما ينتج عنه نظام مدمج تصل كفاءته إلى ما يقرب من ضعف العملية الصناعية التى حل محلها، فى الوقت الذى يستهلك طاقة أقل بكثير وتنتج عنه انبعاثات أقل لدفيئة البيت الزجاجى(٦٧).

هذه هى مجرد الخطوة الأولى فى تطبيقات التصنيع البيولوجى، ومن المهم أن نلقى الضوء على التناقض بين التقنيات الحالية والتقنيات المستقبلية. ولسوف يتضاءل

حجم الإنتاج الإجمالي للمركبات ذات الأهمية الاقتصادية بصورة متزايدة فى داخل الأنظمة البيولوجية، المستوعَبَة بداخل كائنات وحيدة الخلية (وفى النهاية، متعددة الخلايا). وهناك تمويل هائل الحجم يقف وراء تلك الجهود.

وفى صخب شديد أعلنت شركة بريتيش بتروليوم عن استثمار ٥٠٠ مليون دولار فى معهد العلوم البيولوجية للطاقة، وهو مشروع يستغرق عشر سنوات لتطوير تكنولوجيات جديدة للوقود الحيوى فى جامعة كاليفورنيا فى بيركلى، وجامعة إلينوى فى أوربانا – شامبين، ومعمل لورنس بيكلى القومى. ومن المرجح أن يُخصص جانب كبير من التمويل لبناء مسارات جديدة لإنتاج الوقود وتصنيعه فى كائنات معدلة (جينيًا).

وكاقتراب أكبر لمرحلة التسويق، تعمل كلٌ من شركتى «أميريس بيوتكنولوجيز» و«الليلكس» على تطبيقات لتخليق جرثومى للأيزوبروبرينويدات (isoproprenoids) ، وهى مجموعة واسعة من المركبات لها استخدامات لا تعد ولا تُحصى فى الصناعة وفى مجال الرعاية الصحية. وكمقياس لدرجة تعقد ما بات الآن ممكنًا، نتذكر إسهام أميريس فى إنتاج الأرتميسينين فى الخميرة. وبدءًا من ربيع ٢٠٠٧، توصلت الشركة والمتعاونون معها من الأكاديميين إلى تحسينات قدرها بليون ضعف فى الحصيلة الناتجة فى ست سنوات (انظر شكل ٨-١)؛ ومن الصعب أن نجد مثالاً تاريخيًا يمكن مقارنته بذلك التحسن فى الحصيلة الناتجة فى العمليات الصناعية البشرية أثناء المائتى عام الأخيرة. وهذه مجرد إشارة إلى احتمالات الإنتاج البيولوجى مع دخول المزيد من الأجزاء فى الأنظمة التخليقية.

ليست ثمة ضمانات للنجاح الاقتصادى للشركات التى أشرنا إليها. فالأسواق، التى تؤثر فيها اختيارات صانعى السياسات، ستكون المحك الأخير لاختبار التقنيات والمنتجات البيولوجية الجديدة. وكما ذكرنا فى الفصل الخامس، وحتى فى ظل تحسنٍ أُسى فى الإنتاجية وتناقصٍ أُسى فى التكاليف، فقد تمر عقود قبل أن تحقق التكنولوجيات الجديدة اختراقًا ملحوظًا للأسواق.

بيد أن التقنيات البيولوجية سوف تتقدم حتى وسط خضم إخفاق اقتصادى. ومن المحتمل خلال العقود القادمة أن تؤدى تطبيقات ناجحة للتصنيع الجرثومى المنتشر إلى تغيرٍ فى اقتصادات الإنتاج. ومما لا ريب فيه أن موضوع التوصل إلى نظام تدرجى لإنتاج الوقود الحيوى لم يتحدد بعدُ. ويعود السبب فى ذلك جزئيًا إلى المرحلة المبكرة التى لا تزال تخوضها العديد من تقنيات الإنتاج سواء الصناعية منها أو البيولوجية. غير أننا يتوجب علينا أن نكون على حذر من الافتراضات المتوارثة بأن مستقبل الإنتاج البيولوجى سيكون مماثلاً للإنتاج الصناعى التاريخى. فمن الممكن للإنتاج المنتشر بصورة واسعة مستخدمًا المواد الخام المتاحة محليًا أن يغير تغييرات جوهرية فى الطريقة التى نفكر بها فى الأمور اللوجستية بداخل اقتصادنا.

ليس واضحًا بعدُ، باستخدام نطاقات الأنظمة التدرجية الممكنة، أين تكمن أفضل مزايا تنافسية. ومن الأرجح أنه لن يكون ثمة «فائز» واحد، فسوف يتسم المستقبل بوجود تنوع أكبر من خطط الإنتاج، سواء كانت بيولوجية أم صناعية.

سوف يكون اختيار المادة الخام - مدى توفرها ومحتواها من الطاقة بصفة خاصة - أمرًا حاسمًا فى استيعاب المدى الذى يضرب فيه الوقود الحيوى مثلاً لفكرة الإنتاج البيولوجى الموزَّع. وعلى سبيل المثال، إذا كانت المادة الخام هى قصب السكر، فإن اقتصاديات العملية سوف تمليها على الأرجح تكاليف الحصول على المادة الخام وتكاليف شحنها. وإذا وضعنا فى اعتبارنا تكلفة الشحن بالسفن، فإن ذلك قد يعنى أن إنتاج الوقود لابد وأن يتم أقرب ما يكون إلى موقع إنتاج المادة الخام (مثل البرازيل)، وبالتالى نضمن أن أغلى مُنْتَجٍ فقط هو الذى سيتم شحنه لمسافات بعيدة. أما إذا استُخدِم النشاء أو السليولوز، فإن الإنتاج يمكن أن يتم أقرب ما يكون إلى مواقع الاستهلاك، أى فى جاراج المنزل نظريًا. ومعنى ذلك أنه لما كانت محاصيل النشاء والسليولوز يمكن أن تنمو بصورة اقتصادية فى أماكن أكثر مما يمكن لقصب السكر، فإن التكنولوجيا التى تسمح باستخدام تلك المواد الخام سوف تتيح أيضًا التصنيع الموزَّع أينما أمكن حصاد تلك المحاصيل أو سهولة شحنها بالسفن.

«السيارة هى معمل التكرير»

إن البنية التحتية لنقل االنشاء والسليولوز (والسكر) بحراً إلى المستهلكين موجودة بالفعل فى كل أرجاء العالم المتطور على صورة الأسواق المحلية. وتصنيع هذه المواد الخام فى الجاراج يتطلب وحدة إنتاج محلية. وقد تصبح السيارات ذاتها وحدة إنتاج للوقود الذى تستهلكه هذه السيارات. وذكر مقال نُشِر فى ربيع ٢٠٠٧ نجاح بناء مسار تخليقى، يتكون من ١٣ إنزيماً، تحول النشاء مباشرة إلى إيدروجين[٦٨]، ويشير ذلك إلى بنية تحتية مستقبلية يوضع فيها السكر أو النشاء - وهى مواد تتوفر فى أى مجمع استهلاكى - فى خزان االسيارة مباشرة بدلاً من البنزين أو الإيثانول أو أى وقود سابق التحضير. وتتسم عملية التموين بالوقود الافتراضية هذه بالبساطة المفرطة: فالمستهلك يضع السكر أو النشاء، فتهضمه الإنزيمات، ويخرج غاز الإيدروجين مثلما تخرج الفقاقيع من الصابون ثم يُستَخدَم فى خلية وقود لتزويد السيارة بالقوة الكهربية.

وهذا العرض المبدئى بعيد الشُقَّة عن أن يكون مصدراً لوقود مفيد. غير أنه يستحق الذكر هنا لأن مؤلفى المقال استخدموا أحد عشر إنزيماً جاهزاً (من السبانخ والأرانب والإشكريشة القولونية والخميرة) حصلوا عليها من مورد تجارى، واثنين استخرجوهما بأنفسهم (من الإشكريشة القولونية وأركايا بيروكوكس فوريوسس (Archaea Pyrococcus furiosus) ومع الفائدة الواضحة فلن يطول الوقت قبل أن يصبح الإنزيمان الأخيران متاحين تجارياً.

ومن اللافت للنظر أن هذا المشروع، فى واقع الأمر، يضع على المنضدة قطعاً جديدة قابلة للتركيب لإنتاج الوقود الحيوى (انظر الفصلين الخامس والسابع)، حتى ولو كانت الملكية الفكرية ليست على المشاع. ويضاف إلى ذلك أن تلك القطع الجديدة قد تم تحديد صفاتها بصورة معقولة، على الأقل فى المختبر. وبإجراء بحث خاطف فى «سجل القطع البيولوجية المعيارية» لا نجد هذين الإنزيمين بعدُ، ولكن نظراً لأن سلسلة

الجينات إما أنها موجودة بالفعل فى قواعد البيانات العامة أو من السهل نسبيًا إنتاجها، فإن تلك الفجوة تشير إلى منطقة لتوسع لبنات البناء البيولوجية بصفة عامة وآى جم بصفة خاصة.

إن حقيقة أن كل تلك الإنزيمات لا تزال غير معدلة حتى الآن تعنى أن ثمة مجالاً واسعًا ليس فقط لتعديلها كى تكون أكثر ملاءمة داخل المسار وإنما لتعديل المسار برمته. ويلاحظ المؤلفون أن الصورة المعدلة من تقنيتهم والتى تنتج أكبر حصيلة هى جرثومة معدلة بحيث تعبر عن كل الإنزيمات الثلاثة عشر، وفى هذه الحالة يمكن لسيارة تستمد طاقتها من النشاء أن يصبح نوعًا من السايبورج(*)، فتعتمد على كائنات حية لتزويد غلاف غير عضوى بالطاقة.

وفى استجابة لأوصافى لتلك التكنولوجيا فى مؤتمر حديث لمديرى شركات صناعة البترول، برهن أحد الحاضرين على استيعابه الفورى لتلك الاحتمالات، مقررًا أن "السيارة هى معمل التكرير". وإذا ما قُدِّر لهذا الابتكار أن يرى النور، فسوف تنشأ أسواق جديدة تمام الجدة، لن تشكل فيها البنية التحتية لنقل البترول وتكريره والتى أشار إليها هؤلاء المديرين، لن تشكل مزية تنافسية. ويضاف إلى ذلك، أنه إذا حدث أن التصنيع الإنزيمى والجرثومى المنتشر لمواد خام بسيطة يستطيع أن ينافس فى التكاليف فى أسواق السلع ذات هامش الربح المنخفض مثل الوقود السائل للنقل، فإنه من المرجح أن الإنتاج البيولوجى المنتشر سيتغلغل أيضًا فى أسواق السلع ذات هامش الربح المرتفع.

(*) السايبورج شخص يحتوى جسمه على أجهزة آلية أو كهربية وقدراته الجسمانية أكبر من قدرات إنسان طبيعى، مثلما ظهر فى الحلقات التليفزيونية «المرأة البيونية» و«رجل بستة ملايين دولار» فى ثمانينيات القرن المنصرم. (المترجم)

إن وجود بنية تحتية للإنتاج البيولوجى المنتشر سوف يخفض من قيمة المشاريع التى تعمل حاليًا فى مجالات تصنيع البضائع وشحنها، وسوف يرفع من قيمة مؤسسات تصميم الكائنات والدارات الجينية التى تسمح بالإنتاج المحلى. فإذا ما تغير الإنتاج تغيرات جوهرية بحيث تتجاهل المزايا المادية للمؤسسات ذات الإمكانات العالية للتصنيع، فإن اقتصادات مختلفة بصورة مثيرة سوف تلعب دورها. والإنتاج المنتشر سوف يسمح بالمشاركة فى الأسواق على معايير تصاعدية مختلفة، وتساعد على ذلك الإنزيمات والجراثيم التى «تلتهم» تنوعًا من المواد الخام. وسيلعب النشاء والسليولوز أدوارًا مهمة فى الإنتاج البيولوجى مع توفر الإنزيمات التى تتعامل اقتصاديًا مع تلك المواد الخام.

وبصورة أكثر شمولاً، نجد أن التنوع المتزايد للمواد الخام وخطط الإنتاج سوف يؤدى على الأرجح إلى مساندة نموذج اقتصادى يتسم ببنية تحتية أكثر انتشارًا من مثيلتها فى الاقتصاد الحالى. ومن المغرى أن نخمن أن اقتصادًا بيولوجيًا ناضجًا قد يعتمد على بنية تحتية تصنيعية تتسم بسمات مشابهة للبيولوجيا ذاتها. وعلى وجه الخصوص، ثمة قلة قليلة من الكائنات على ظهر كوكبنا قد تطورت بحيث يزيد عرضها على نحو المتر. ويتم إنتاج الجانب الأعظم من الكتلة الحيوية، وبالتالى الجانب الأعظم من التصنيع البيولوجى، فى تدرج طولى من ميكرونات إلى سنتيمترات. ومن الممكن لبنيتنا التحتية الإنتاجية أن تتعذر التفرقة بينها وبين أنظمة الجراثيم والحشرات والبقر.

وفى أحوال كثيرة، يثبت الإنتاج البيولوجى بالفعل أنه أقل تكلفة عن التوجهات الصناعية التقليدية لصناعة الكيماويات والمواد[٦٩]. وفى الآونة الأخيرة تم إنفاق استثمارات كبيرة فى سبيل اكتشاف ما إذا كانت نفس التوجهات تنطبق على الإنتاج البيولوجى للوقود. غير أنه قبل تنفيذ كل ذلك فمن المرجح أن اقتصادًا قائمًا على الهندسة المنطقية للأنظمة البيولوجية سوف يحتاج إلى مكتبة لقطع قابلة للتركيب وسلوكياتها معروفة ومحددة.

بناء المستقبل

إن الاقتصاديات التكنولوجية الصحية لا تُبنى فوق تشييدات بُنِيت دفعة واحدة فقط وإنما فوق أنظمة هرمية من قطع ووفق طرقٍ، بحيث إنها عند انتزاعها من فوق الأرفف وتركيبها في تركيبات تؤدى وظائف عديدة. ويقول الاقتصادى و. بريان أرثر،

> **إن كل مكونات نظامٍ أو تركيبة تكنولوجية لها هدف، أى مهمة تؤديها. فإن لم يكن الأمر كذلك فلا داعي لوجودها ... وكل تركيبة لها مكوناتها. وبدوره، كل مكون منها له مهمة ينفذها. وكل منها أيضًا هو وسيلة، أى تكنولوجيا. وهذا النمط، الذى يعنى أن التكنولوجيا تتكون من مزيد من لبنات البناء هى فى حد ذاتها تكنولوجيات، هذا النمط يتكرر حتى يصل إلى المستوى الأساسى للمكونات الفردية ... وهذا يعنى من الناحية العملية أن التكنولوجيا منظمة تنظيمًا هرميًا فضفاضًا مكونًا من مجموعات من قطع وقطع فرعية هى أيضًا تكنولوجيات. ويمكن لهذا النظام الهرمى أن يصل عمقه إلى خمس أو ست طبقات(٧٠).**

وإذا طبقنا هذا التفكير بطريقة محددة على تعديلات الأنظمة البيولوجية فسوف نصل بالقدرات الثابتة للهندسة المنطقية إلى مجموعة قوية ونامية من القطع القابلة للتركيب. والعالم البيولوجى الذى نشاهده من النافذة يعمل بطريقة مشابهة وإن لم تكن مطابقة.

والحياة على ظهر الكرة الأرضية تعيد استخدام مجموعة من الأحماض النووية والأحماض الأمينية وأنواع من الببتيدات وأصناف عامة من بروتينات كاملة ومسارات أيضية. ويبدو أن الأمثلة التاريخية للابتكارات البيولوجية الطبيعية – أى التطور – كثيرًا ما تلى أخطاء تكرار الجينومات التى تنتج جينات متكررة، ثم تليها إعادة استخدام وإعادة تشكيل البروتينات والدوائر الجديدة الزائدة على الحاجة للتزود بقدرات جديدة.

غير أن المدى الزمنى الذى فيه تصنع الأنظمة البيولوجية تجميعات جديدة وتختبرها - أى تصميمات جديدة - يختلف اختلافًا شاسعًا عن المدى الذى تحتاجه التكنولوجيات الموجودة بين أيدى البشر. فالابتكارات البيولوجية الطبيعية يتحكم فيها على المدى الزمنى القصير نمو الأفراد وتكاثرهم وعلى المدى الطويل التغيرات البيئية والجيولوجية التى تشكل ضغوطًا على السكان. والآليات البيولوجية الموجودة مسبقًا التى تنتج عنها تجميعات جديدة للقطع تجنح إلى أن تكون بطيئة بالمقارنة مع طول حياة فرد ما، باستثناء تطبيقات بالغة التخصصية.

وعلى النقيض من ذلك، نجد أن التصميم والبناء البيولوجى الذى تجريه أيادٍ بشرية يستجيب لمتطلبات الاقتصاد البشرى، بما فى ذلك اعتبارات الأمن والسلامة، وفيه تتحدد تكاليف تطوير المنتَج بوحدات من الشخص، الأيام مُعَرَّفَةً بالعملة المحلية. وتبلغ الدورة الإنتاجية لمستلزمات الحاسب والاتصالات اليوم نحو ثمانية عشر شهرًا، وتصل فى حالة الإلكترونيات الاستهلاكية إلى ما يقرب من ستة أشهر فقط. وكثيرًا ما يتقرر البدء فى دورات تصميم وتصنيع جديدين بمجرد أن تتم تعبئة المنتج الأوَّلِى فى الصناديق تمهيدًا لشحنها إلى الأسواق، مما يخلق تسارعًا لا يرحم فى أرقام الموديلات. وثمة ضغوط متصاعدة باستمرار لإطلاق حاجيات وأدوات أسرع وأكفأ، وفى نفس الوقت تتضاءل هوامش الربح بالمنافسة المنخفضة التكلفة وأسعار التكنولوجيات الأساسية التى لا تكف عن الانخفاض.

ولا يزال من الصعب تطبيق تلك الأفكار على الهندسة البيولوجية. واليوم يأتى العديد من المشاريع الناجحة من المعامل الأكاديمية، حيث كثيرًا ما تُستبعد التكاليف بوصفها جزءًا من البنية التحتية الموجودة وحيث العمالة رخيصة بصورة مفتعلة. غير أنه حتى فى إطار المنتجات القليلة نسبيًا ذات القيمة الدولارية التى يمكن إدراكها، سواء كانت وقودًا حيويًا أم لدائن أو أدوية، فإن هناك تقدمًا كبيرًا يمكن ملاحظته. ومهما كانت طريقة القياس، نجد أن ثمة تسارعًا فى الابتكارات فى تطوير التكنولوجيا البيولوجية واستخداماتها.

الدفع قُدُماً بالابتكارات

إن القدرة على الابتكار السريع داخل السياقات التجارية هى مجرد مكون واحد من مكونات الاقتصاد البيولوجى. والبيئات التنظيمية والتمويلية هى مكونات حاسمة ومصيرية للنظام، مع تحديد الحكومة للأولويات وفقًا لتفضيلاتها. غير أن التمويل الأساسى الذى تسهم به الحكومة يحتاج أن يُنظَرَ إليه وفقًا لأهميته.

وفى حين كان الدعم الحكومى الكبير حاسمًا فى النجاح النهائى للطيران والحاسبات المكتبية، إلا أنه فى كلتا الحالتين كانت الدوافع وراء التسويق فى غالبيتها هى الابتكارات التى تمت فى الجاراجات حرفيًا. وفى السنوات المبكرة للطيران تطور العديد من المكونات المهمة - بالذات أنظمة السيطرة وتصميمات محطات الطاقة وطرق البناء - تطورت قبل أن يتبلور التمويل الحكومى فى الولايات المتحدة، وهو التمويل الذى كان متاحًا من قبل على أية حال على صورة عقود مشتروات للطائرات العاملة وليست كدعم للبحوث. ولقد حصل تطوير التقنيات الخاصة بالحاسب الشخصى على دعم الحكومة لتطوير البرمجيات، وتصميم وتصنيع الدارات المدموجة، وتقنيات العرض، ولكن ابتكارات الأفراد فى الشركات الناشئة هى ما أتاح التصميمات الناجحة والتجميع الناجح، وأوجد سوقًا لأسلاف أجهزة اليوم القوية.

فى الفصلين التاسع والعاشر من هذا الكتاب جادلت بأن نظم القواعد التنظيمية التى تضع قيودًا على المستثمرين والشركات الصغيرة وتتعلق بحرية الوصول إلى أدوات الهندسة واستخدامها سوف تعيق الابتكار الذى تتطلبه المحافظة على الأمن الاقتصادى والمادى. وهذا الاستنتاج تعززه اعتبارات الاقتصاد الأكبر والتأثيرات النامية للتكنولوجيات البيولوجية. وتنبنى فكرة أن الابتكار فى الهندسة البيولوجية يمكن المحافظة عليه على الرغم من تحجيم حرية الوصول إلى الأدوات والمهارات على فهم خاطئ لتاريخ الابتكار فى القرن العشرين.

ويحتاج الابتكار الناجح إلى حرية واسعة المدى للوصول إلى كلٍّ من التكنولوجيا والقطع الكثيرة، سواء في أيدي مايكل دِل، أو ستيف جوبز وستيف فوزنياك، أو الأخوان رايت، أو أوتو ليلنثال، أو وليم بوينج، أو الأفراد التحويليين الذين لم تُعرف أسماؤهم بعدُ العاملين في البيولوجيا. ويتطلب الابتكار في الواقع نظامًا بيئيًا صحيًا يتكون من أفراد وأفكار وقطعًا أكثر بكثير مما يستطيع ابتكاره الفرد الواحد من المبتكرين. وبمعنى آخر، يحتاج الابتكار إلى مجموعة من الأفكار أو الأشياء التي تكون الإطار الذي يتيح للقطعة الأخيرة أن تستقر في مكانها؛ وهذه القطعة الأخيرة هي مجرد واحدة من قطع عديدة. ويضاف إلى ذلك، وكما يوضح سكوت بركون في كتابه «أساطير الابتكار:The Myths of Innovation» ، أنه لكي يترك أي اختراع محدد أو تقدم علمي بعينه أثرًا، يتعين أن تنزل به إلى الأسواق وتضعه بين أيدي الأشخاص الذين سوف يستخدمونه: "في الوقت الذي يقال فيه الكثير حول إقامة الحواجز والسُتُر، تحدث الاختراقات في المجتمعات تنتشر فيها الابتكارات"(٧١). ويعتمد انتشار ابتكار ما في مجتمع ما على مجموعة معقدة من التفاعلات التي تلعب عند التقاطعات الحقيقية للتقدم التكنولوجي وعوامل أكبر بكثير من أي فرد أو مجموعة صنعوا ذلك الابتكار. ولكي نربط هذا الجدل بمسيرة التكنولوجيا التي قدمناها في الفصل الخامس، وبالنتائج المحتملة لتنفيذ التصاميم البيولوجية المنطقية، سوف أقتبس مرة أخرى عن زميلي جيمس نيوكومب بشركة «بيوإيرا»: "إن الأنظمة التي ترعى ابتكارات غزيرة من خلال تجميعات ليست مجرد أنظمة فنية؛ فثمة شروط مسبقة أخرى تشمل هياكل اقتصادية واجتماعية وتنظيمية تحدد ملاءمة القيمة التي يضعها المبتكرون وأنظمة الملكية الفكرية، بحيث تدعم تراكم الابتكارات الخلاقة بمرور الزمن"(٧٢).

وبدون وجود آلية تتيح للمبتكرين أن يتربحوا من عملهم – ومن الاختراعات التي تنتج عن عملهم – يتوقف الابتكار. والمقدرة على بناء ابتكار فوق آخر تخلق حزمة من التقنيات الجديدة تولد كلاً من الثروة وفرص العمل. ومن حيث المبدأ، تتجسد آلية

الإفـادة من الابتكارات فى أنظمـة براءات الابتكار. ولسـوء الحظ، وكمـا سنرى فى الفصل التالى، نجد أن نظام براءات الابتكار بأوضاعه الحالية كثيراً ما يؤدى إلى تثبيط الابتكار.

وتدور المشكلة الكامنة فى النظام الحالى حول سؤال بسيط بدرجة خادعة: ما الذى تعنيه ملكية فكرة؟

الفصل الثانى عشر

عن سترات المجانين المقيَّدَة ومنصات القفز باعتبارها أفكارًا للابتكار

إن الدستور الأمريكى ليس ضامنًا لحق ملكية الأفكار فى أى بند من بنوده[١]. بل إنه، وفقًا للمادة ١ القسم ٨، "للكونجرس السلطة ... لكى يعزز العلم والفنون المفيدة، يضمن لأوقات محدودة للمؤلفين والمخترعين الحق الحصرى فى كتاباتهم ومخترعاتهم"[٢]. وتمنح المساهمة فى «صفقة براءة الاختراع» للمخترعين احتكاراً مؤقتًا مقابل الكشف الكامل عن الاختراع، وكل ما يتعلق به من معلومات ومهارات ضرورية لإعادة إنتاجه. والأوضاع المثالية تقتضى أن يكون نظام براءة الاختراع أداة لتشجيع المبتكرين. ومن الناحية العملية، وعلى مدى عدة قرون سالفة، كثيراً ما كان النظام مدبراً ببراعة بحيث يقيد الابتكار. وسوف نرى فى التو كيف أبطأت براءات الاختراع من تقدم التقنيات المختلفة، ومنها السيارات والطائرات.

يستكشف هذا الفصل عواقب براءات الاختراع التى قد تؤخر تطور التكنولوجيات البيولوجية. وعلى سبيل المثال، كيف سيكون رد فعلنا إذا حدث، فى حالة جائحة مرضية عالمية، أن الإجراءات المضادة لم تتوفر بسبب بطء التطور لا بسبب صعوبات فنية، وإنما لوجود حوائط سد أقامتها مؤسسات «تمتلك» حق الملكية الفكرية؟ ولعلنا سوف نحتاج سريعًا أن نفكر فى وسائل مختلفة لتشجيع الابتكار فى التكنولوجيات البيولوجية.

استُن أول تشريع لبراءات الاختراع فى الولايات المتحدة سنة ١٧٩٠، مانحًا المخترعين "الحقوق الوحيدة والحصرية" لمخترعاتهم لمدة أربع عشرة سنة[٣]. وفى سنة ١٧٩٣ حل قانون آخر محل هذا القانون وفيه نشأ مكتب براءات الاختراع، التى أصبح وزير الخارجية هو من يمنحها[٤]. ومنذ ذلك التاريخ جرت تعديلات عديدة على القانون، مع ما يربو على قرنين من «قوانين القضايا» (التى يصدرها القضاة[*]) والتنظيمات الإدارية (من مكتب البراءات)؛ ويحتاج الحجم الهائل من القوانين إلى خبرات محامين متخصصين فى براءات الاختراع كى يستوعبها. ومن الطبيعى أن ذلك يمثل أحد أسباب التكلفة العالية للحصول على براءة الاختراع. والطلب المبدئى لتسجيل براءة اختراع تكلفته متواضعة نسبيًا، وتصل إلى بضعة آلاف من الدولارات، ولكن إضافة تكلفة المدعى المتخصص فى البراءات ومصاريف التقدم بالطلب تتصاعد التكلفة سريعًا إلى بضع عشرات الألوف من الدولارات. وقد تصل التكاليف بالنسبة للأجانب إلى ١٠٠,٠٠٠ دولار. وبهذا فإن الإسهام فى «صفقة براءة الاختراع» يتضمن تكاليف باهظة، إضافةً إلى ما يكون قد أُنفِق فى عملية الاختراع ذاتها.

وإذن ما النتيجة التى يحصل عليها مخترع نتيجة لمجمل ما أنفقه من استثمار؟ فى الوقت الحالى نجد أن القوانين التى تكدست (لعل كلمة «تكاثرت» تكون أفضل) تتعامل مع البراءات بوصفها أكثر بكثير من كونها «حقًا حصريًا» لتشغيل اختراع أو بيع نسخ من خلق فنى بهدف الربح. والآن يتم التعامل مع براءات الاختراعات وحقوق الملكية الفكرية بوصفها ملكية يتم فيها التبادل التجارى مثل الأراضى أو الأشياء المادية. ويقول لورنس لسيج (Laurence Lessig) أستاذ القانون بكلية الحقوق جامعة هارفارد والخبير الحكومى فى محاكمة شركة ميكروسوفت فى

(*) ينص النظام القضائى الأمريكى على أن بعض الأحكام التى يصدرها قضاة فى قضايا خاصة تصبح لها قوة القوانين الصادرة من الحكومة، وخاصة إذا كان الحكم يتضمن سن مبدأ قانونى جديد، ويطلق عليها اسم «قوانين القضايا المرجعية». (المترجم)

قضية مكافحة الاحتكار: إن حقوق الملكية الممنوحة الآن لحاملى البراءات، لا تتفق مع الأهداف الأصلية لدستور الولايات المتحدة بمنح البراءات باعتبارها سلعة اجتماعية:
"إن براءات الاختراع ليست ملكية أكثر من كون الرفاهية ملكية (وليست أقل منها فى ذلك). وقد يكون ثمة مغزى وراء منح براءات الاختراع، مثلما أن ثمة مغزى وراء توفير الرفاهية. ولكن فكرة أن هناك حقوقًا فى براءات الاختراع هى فكرة سخيفة ومنافية للعقل. ومنذ اللحظة الأولى أدركت تقاليدنا بالوعى الذاتى أن القضية الوحيدة التى تتحكم فى منح براءة اختراع من عدمه هو ما إذا كانت البراءات سوف يستفيد منها المجتمع أم لا ... والبراءات ليست شرًا فى حد ذاتها؛ فهى شر إذا لم تكن من ورائها فائدة مجتمعية. وهى لا تشكل فائدة مجتمعية إذا اقتصرت الفائدة منها على شركات بعينها على حساب الابتكار عامة"(٥).

ووفقًا لما يقرره لسيج، فإن التعزيز التدريجى للسيطرة على الأفكار فى أيدى حاملى البراءات والملكية الفكرية يسبب توجسًا كبيرًا. وظاهريًا يتناول كتابه «مستقبل الأفكار: The Future of Ideas » تاريخ الإنترنت ومستقبله. غير أنه فى حقيقة الأمر كتاب عن الابتكار وما يحدث للابتكار عندما تتم خصخصة الموارد العامة:

> النتيجة ... هى تغير المناخ الذى يتم الابتكار بداخله. ولقد كان هذا التغير، أو هو ينذر بأن يكون، تحولاً من عالم يسيطر فيه العامة إلى عالم تمت فيه استعادة السيطرة. وهذا التغير هو تباعد عن الموارد المفتوحة التى اتسم بها الإنترنت فى أول ظهوره إلى عالم تمكن فيه عدد أصغر من السيطرة على الكيفية التى تنتشر بها الموارد فى هذا الفضاء.
>
> وسوف تكون لهذا التغير نتائجُ. وسوف يتخذ فيه القديم مواقف معادية ضد الجديد. وسوف تتمركز فيه تلك الأنماط من الإبداع التى تتيحها الشبكة العنكبوتية ويتم التسويق لها. وسوف تخنق الإبداع الموجود خارج نطاق صورة العالم التى يفضلها أولئك الذين يملكون زمام السيطرة(٦).

هذه كلمات جريئة ومستفزة، وربما كانت عدوانية أو ملهِمة، وفقًا لوجهة النظر التى يتبناها القارئ. ويؤكد لسيج تأكيدات عديدة حول التأثيرات المؤذية للملكية الفكرية على قدرات الإبداع والابتكار، ويمكن لهذه التأكيدات أن تنطبق بصورة عريضة على التكنولوجيا، بما فيها البيولوجيا. غير أن ذلك رأى للمناقشة الجدلية ولا يُقبل بصورة مطلقة. ومن المفيد أن نبدأ بمثال تاريخى يثبت أن حقوق الملكية الفكرية قد قللت، بصورة ضارة، من سرعة الابتكار.

نزوة طيران براءات الاختراع

لكى نسبر أغوار المستقبل الاقتصادى للتكنولوجيا البيولوجية، من المفيد أن نتفحص التحول الذى حدث فى الطيران من طيران للهواية والمتعة بواسطة مجموعة من الميكانيكيين المختصين فى الدراجات الهوائية إلى طيران يتفاوض فيه محامون متخصصون فى براءات الاختراع حول مستقبل الصناعة.

كتب ويلبور رايت فى أول تراسل بينه وبين أوكتاف شانوت، مؤرخ فى ١٣ مايو ١٩٠٠، "أنا لا أخفى سرًا خاصًا بخططى لأنى أؤمن بأن مخترع الجهاز الطائر لن يعود عليه ذلك بأى ربح مادى، وأن أولئك الراغبين فى الإدلاء باقتراحات بمثل ما هم راغبون فى تلقيها هم فقط الذين يمكن أن يأملوا فى ربط أسمائهم بشرف اختراعها"(٧). وأجاب شانوت بعد بضعة أيام: "أنا متعاطف معك تمامًا فى اقتراحك بإجراء تجارب؛ وبخاصة وأنا أؤمن مثلك بأنه لا يجب توقع ربح مادى من تلك الأبحاث لفترة طويلة"(٨). غير أنه بمجرد أن تبين أن الربح المادى صار أمرًا ممكنًا، شرعت جهات مختلفة تتقدم بمطالبات. وتقدم الأخوان رايت بطلب تسجيل أول براءة اختراع فى ١٩٠٢، وحصلوا عليها فى ١٩٠٦، ولم يكن شانوت نفسه معارضًا على الإطلاق لفكرة براءات الاختراعات بصورة عامة، وخاصة بعد أن حصل لنفسه على العديد

منها. غير أنه يبدو أنه فى حالة الطيران بالذات كان يعتبر البراءات وسيلة للحصول على قروض وليست وسيلة للتربح المادى.

فى ١٩٠٨ سلم الأخوان رايت تفاصيل تصميم طائرتهم إلى «رابطة تجارب الطيران» (Aerial Experiment Association, AEA)، وهى مجموعة أنشأها ألكساندر جراهام بل. وفيما بعد اكتشف الأخوان رايت أن عضواً فى هذه الرابطة هو جلن كيرتيس كان يتربح من بناء الطائرات مستخدمًا معلومات وردت فى تصميمهم الذى كان محميًا بالبراءة التى حصلوا عليها سنة ١٩٠٦[٩]. وأقام الأخوان دعوى بسبب انتهاك البراءة سنة ١٩٠٩ أبقت شركتهما «مؤسسة رايت – مارتين» مشتبكة فى نزاع قانونى مع شركة هيرينج – كيرتيس (وكان أحد شركائها المؤسسين أوجستس هيرينج مساعداً سابقًا لشانوت) لما يقرب من عقد كامل.

وفى سنة ١٩١٠ أدلى شانوت بحديث صحفى رأى فيه ويلبور رايت أنه ادعاء بأن براءة الاختراع الأولى للأخوان رايت لم تضف شيئًا إلى مستوى الفن[١٠]. ورد ويلبور رايت غاضبًا بخطاب قرر فيه أن إسهامات الأخوين فى طرق البناء والسيطرة ليست فقط جديدة تمام الجدة وإنما أيضًا أنهما يستحقان الحصول على جزاء عن جهودهما، التى بذلوها سواء كمدفوعات مادية أو من عرقهما الذى بذلاه. وإضافة لذلك، فهما يريدان استمرار التمويل حتى يستمرا فى الأبحاث.

ونتج عن تكاليف الدعاوى القضائية المتعلقة بالبراءات والتقاعس فى منح الترخيص أن تباطأت الابتكارات فى الطيران فى الولايات المتحدة أثناء العقود الأولى من القرن العشرين[١١]. وكان استئناف الابتكارات السريعة فى الطيران موضع اهتمام كبير لحكومة الولايات المتحدة، كما ذكر كلارك وزملاؤه، "لأن أكبر حَمَلَةٍ لبراءات الاختراع، وهما شركتا رايت وكيرتيس، سدا الطريق بفاعلية أمام بناء أية طائرة جديدة، رغم الاحتياج الملح للولايات المتحدة للطائرات بسبب اعتزامها دخول الحرب العالمية الأولى"[١٢]. وفى سنة ١٩١٧، وبتشجيع من اللجنة التى شكلها فرانكلين د. روزفلت مساعد وزير البحرية، أنشأ صانعو الطائرات فى الولايات المتحدة اتحاداً

مشتركًا للبراءات كى تتوقف الدعاوى القضائية، ولتحسين الحصول على التراخيص والإسراع فى الابتكار. وفى الواقع، وبناء على «طلب» الحكومة الفدرالية، تخلت الأطراف المختلفة عن حقوقها الحصرية طواعيةً من أجل تشجيع الابتكار.

الكل فى الاتحاد المشترك لبراءات الاختراعات؟

الاتحاد المشترك لبراءات الاختراعات هو اتفاق تعاقدى تَوَافَقَ عليه حملة البراءات. ويحق للاتحاد أن يُخَفِّضَ حقوق الملكية أو يلغيها وفقًا لشروط محددة فى الوقت الذى يسمح فيه بحرية حق الدخول إلى كل البراءات المشاركة فى الاتحاد. وكما يقرر روبرت ميرجس أستاذ القانون بجامعة كاليفورنيا فى بيركلى، يوفر اتحاد البراءات وسيلة للتعاون بين الأطراف المختلفة التى تمتلك براءات متنافسة أو متكاملة(١٣).

ولقد تم اتخاذ إجراءات مماثلة فى صناعات كثيرة أخرى، يسرتها براءات حقوق الملكية. ويجادل ميرجس بأن صناعة السيارات على وجه الخصوص "بدون حقوق الملكية – تساندها تهديدات الإنذارات القضائية التى تخنق الإنتاج – ما كانت المزايا التى يتيحها اتحاد البراءات لتتحقق. ولاحظ أن تلك المزايا شملت ما هو أكثر بكثير من مجرد توقف الأعمال العدائية. فقد شملت التبادل المؤسسى لكل أنواع المعلومات الفنية غير المغطاة ببراءات الاختراع، وإنشاء هيكل للمهمة الدقيقة الخاصة بتحديد معيارية أحجام وأشكال قطع السيارات"(١٤). وأكرر النقطة المحورية: خَلُصَ ميجس إلى أن حقوق الملكية أتاحت بناء تنظيمات تعاقدية من خلال اتحاد براءات الاختراع. وبدوره، أتاح هذا الاتحاد نموًا صناعيًا جوهريًا بفتح باب استخدام الابتكارات، ومن ثم تحويلها إلى قطع معيارية. وثمة سبب رئيسى لكون أن نوعًا من التشارك قد بات أمرًا ضروريًا هو: أن الجهود الهندسية لبناء طائرات وسيارات جديدة تطلبت استخدام العديد من الاختراعات التى يغطيها تنوع كبير من البراءات. وخلقت وفرة البراءات

ودعاواها المتصادمة حواجز أمام الاختراع، على هيئة «غابة البراءات». ويبدو أن هذه مشكلة عامة أصابت غالبية الصناعات، وعلينا أن نتوقعها فى القطاعات المختلفة التى تستخدم التكنولوجيات البيولوجية.

كثيراً ما يؤدى وجود غزارة براءات الاختراع فى صناعةٍ ما إلى خلق ما يُطلق عليه «مأساة العداء للمشاع» وهو مفهوم نشأ أول ما نشأ على يد مايكل هلر بكلية الحقوق جامعة ميتشيجان. وقد طبق هلر وربيكا أيزنبرج الفكرة على التكنولوجيا البيولوجية سنة ١٩٩٨: "إن مورداً من الموارد لهو عرضة للاستخدام المتدنى فى سياق «مأساة العداء للمشاع» عندما يكون هناك ملاك عديدون كلٌ منهم له حق استبعاد الآخرين ولا يملك أى منهم مزايا استخدامية فاعلة. وتعنى "مأساة العداء للمشاع" العقبات (المعقدة) التى تنشأ عندما يحتاج مستخدمٌ إلى الولوج إلى بيانات محمية ببراءات اختراع لخلق منتج وحيد مفيد. وتسمح الخطوة الأولى لمالك البراءة أن يقيم كُشكًا لتحصيل حقوق الملكية على الطريق المؤدى إلى تطوير المنتَج، مما يضيف إلى أعباء التكاليف ويبطئ من سرعة الخطوات التالية للابتكار الطبى البيولوجى"[١٥]. ويذكر ميرجس أنه "بمجرد نشوء «مأساة العداء للمشاع»، فإن تجميع حقوق الملكية فى ملكية خاصة قابلة للاستخدام كثيراً ما تكون عملية مؤلمة وبطيئة"[١٦].

ثمة أسباب عديدة للقلق من أن تؤدى براءات الاختراع إلى إبطاء الابتكار فى التكنولوجيا البيولوجية. ففى التكنولوجيا البيولوجية الصناعية لا يقتصر الأمر على أن أعداد البراءات تتنامى بسرعة فحسب، وإنما تتنامى أيضًا أعداد البراءات التى تُمنح كل سنة[١٧]. كما أنه يبدو أن الطلبات المقدمة المتراكمة تتزايد أعدادها أيضًا. ولما كان العديد من الطلبات المُنتظِرة لا تُعلَنُ للجمهور قبل مرور سنة بعد التقدم بالطلب الابتدائى، فكذلك عدم اليقين عما تغطيه تلك الطلبات.

والموقف الآن أن أية دعاوى متنافسة أو متصارعة تتضمنها تلك البراءات، سواء المنتظِرة أو الصادرة، سوف تُحَلُّ فى وقت لاحق بالتفاوض أو فى ساحات المحاكم. وهذا سيخلق وضعًا سيفضى حتمًا إلى التماثل مع الفوضى التى أدت إلى خلق اتحاد

براءات الاختراع فى صناعتى الطيران والسيارات. ويدرك «مكتب براءات الاختراع والعلامات التجارية الأمريكى» تلك القضايا وفى سنة ٢٠٠٠ شكل لجنة لكتابة تقرير يتفحص فوائد اتحادٍ للبراءات وجدواه فى التكنولوجيا البيولوجية. وخَلُص التقرير إلى أن اتحاداً لبراءات الاختراع سوف "يجمع كل الأدوات اللازمة لمارسة تقنية بعينها فى مكان واحد، مما يسمح بـ «التسوق فى خطوة واحدة» بدلاً من الحاجة إلى رخصة من كل مالك للبراءة منفردين"[١٨]. "والنتيجة النهائية هى أن اتحاد براءاتٍ، وبخاصة فى مجال التكنولوجيا البيولوجية، سوف يشجع على الابتكار والبحث الموازى والتطوير، وإزالة عنق الزجاجة من البراءات مع تطوير أسرع للمنتجات"[١٩].

ومن الجائز أن يكون الاتحاد مخرجًا للتكنولوجيا البيولوجية للإفلات من فوضى البراءات. غير أنه ليس بالضرورة أن يكون اتحاد البراءات سهل التطبيق فى التقنيات البيولوجية، لسبب رئيسى هو أن هذا المجال جديد تمام الجدة، ولا تزال قوانين القضايا المرجعية ذات الصلة فى طور التكوين. ويضاف إلى ذلك أن هناك قضايا بنيوية أكبر قد تثبط نشأة اتحادٍ للبراءات أو المساهمة فيه. واليوم، تجد أن ثمة قلة فقط من الاتحادات العاملة لأنها يمكن أن تُستخدَمَ فى أغراض معاكسة للأهداف التى نشأت من أجلها، مما يؤدى إلى تدخلات حكومية وفرض غرامات ضخمة؛ ولقد أدت مكافحة الاحتكار إلى حل اتحاد براءات الطيران سنة ١٩٧٥، لأن الاتحاد كان يُستغَلُّ بواسطة أعضائه فى إقصاء المنافسة[٢٠].

تأثيرات البراءات على البيولوجيا التخليقية

فى خضم الجدل الدائر حول كيفية التعامل مع البراءات فى مجال التكنولوجيا البيولوجية التقليدية، أدى ظهور البيولوجيا التخليقية إلى مزيد من التعقيدات. فهناك اختلافات جوهرية بين البيولوجيا الطبية بصفتها مجالاً تطبيقياً، يتعامل فى المقام الأول مع تسويق الجزيئات على صورة أدوية، والبيولوجيا التخليقية بوصفها منهجًا محدداً

للهندسة البيولوجية، وهو بذلك مجال يتناول استخدامات العديد من الأدوات وقطع من أنظمة معقدة.

وقبل أن أتوغل أكثر فى هذا الموضوع، من الضرورى أن أشرح ما الذى يمكن لبراءة أن تغطى وما الذى لا يمكن أن تغطيه. ويصدر «مكتب براءات الاختراع والعلامات التجارية الأمريكى» براءات عن سلْسلات معزولة ونقية من الدنا، ولكنه لا يمنح براءات عن السلْسلات الطبيعية فى سياقها الأصلى. والمنطق وراء هذا التمييز هو أن الدنا المعزول أو النقى، حتى ولو كان مستمدًا من مصدر طبيعى، هو نتاج براعة بشرية. ولما كانت الجراثيم المعدلة وراثيًا هى أيضًا من عمل البشر، فإن الجينومات والجراثيم الجديدة يمكن استخراج براءات اختراع لها. ومن المفترض أن البراءات توفر سيطرة مطلقة على البُنَى الاصطناعية وسيطرة مطلقة على الإسهامات المستحدثة التى لم يُسبق إلى مثلها، وليس على المعلومات أو الاكتشافات. وأخيرًا، تُمنَح البراءات بسبب وظائف جديدة، بينما حقوق الملكية تحمى الأعمال التعبيرية الأصلية، والتى تُعرف باسم 'المحتوى'.

وفى السنين الأخيرة صارت الحدود بين البراءات وحقوق الملكية الفكرية غامضة. فالبرمجيات، على سبيل المثال، يغطيها مزيج من قوانين البراءات وحقوق الملكية، وهو وضع يجده دارسو القانون «أبعد ما يكون عن الوضع المثالى»[٢١]. ويضاف إلى ذلك أنه من الممكن توسيع نطاق البراءات من خلال تفاسير فضفاضة فى المحاكم للشروط المحدِّدة لإمكانية حصول اختراع ما على براءة اختراع. ويقترح أرتى راى وجيمس بويل، وهما أستاذان للقانون بجامعة ديوك، "ثمة ما يدعو إلى الاعتقاد بأن التوجهات التى يتعامل بها القانون مع البرمجيات من جانب والتكنولوجيا البيولوجية من جانب آخر تتفقان سويًا 'فى تدفق مثال , سوف يعيق احتمالات (البيولوجيا التخليقية)". وقد يؤدى تكوين اتحاد براءات الاختراع إلى إيجاد حلول لبعض تلك القضايا بتسهيل حرية الوصول إلى التكنولوجيا المستحدثة، وتخفيف بعض الحوافز للدعاوى المبالغ فيها. غير أنه بسبب التاريخ المعقد للملكية الفكرية فى كلٍّ من تكنولوجيا المعلومات

والتكنولوجيا البيولوجية، فإن راى وبويل متشائمان بشأن احتمالات أن ينجح اتحاد البراءات فى البيولوجيا التخليقية فى حل النزاعات والمحافظة على حرية التوصل إلى المعلومات: "لما كانت البيولوجيا التخليقية لا تتضمن تكنولوجيا المعلومات فحسب وإنما أيضًا تقنيات بيولوجية، فإن غياب اتحاد ناجح للبراءات فى علوم الحياة هو أمر مثير للقلق"(٢٢).

فليس بمستغرب أن كل الأطراف المعنية ليست على اتفاق حول الخطوات التالية. وعلى وجه الخصوص، وعلى شاكلة الأخوان رايت وكيرتيس الذين انغمسوا فى معارك ترتب عليها تجحيم الابتكار وتعطيل نشأة أنظمة هندسية معقدة، نجد أن الصناعة الحالية المبنية على التكنولوجيات البيولوجية قد تكون تنفذ سياسات تفضى إلى تحجيم الابتكار فى البيولوجيا التخليقية. ومقدرة حملة البراءات على إقامة الدعاوى القضائية وتحجيم استخدام البراءات تشكل قضية محورية. وفى الوقت الحالى كثيرًا ما تصدر المحاكم إنذارات قضائية دائمة تحظر استخدام المواد المحمية ببراءات الاختراع، وهو أمر قد يوقف مسيرة الابتكار فى عصر تتزايد فيه تعقيدات المنتجات:

> **لما كانت البرمجيات والشيبات (chips) من أشباه الموصلات هى تجميعات من آلاف القطع، فإن أيًا منها قد يكون خاضعًا لبراءة معينة، ولذا فهناك أخطار جسيمة أن أحد حملة البراءات يمتلك حقوقًا فى مكون ضئيل يستطيع أن يوقف مبيعات المنتج كله. وعلى ذلك فقد رأت صناعتا الحاسبات والبرمجيات أن تطلبا من المحكمة النظر فى مدى عدالة الإنذارات القضائية فى ضوء الحقائق والمصالح ذات الصلة للأطراف. وكبديل للإنذار القضائى تستطيع المحكمة أن تفرض غرامات مادية فقط. عارضت (منظمة صناعات التكنولوجيا البيولوجية) بعناد إصلاح نظام الإنذارات القضائية، من منظور أن غالبية منتجات البيوتك، مثل الدوائيات، لا تتضمن إلا عددًا محدودًا من البراءات ولهذا لا تواجه إلا أخطارًا محدودة للسطو. ولكن منتجات البيولوجيا التخليقية تتسم عادة بالتعقيد الشديد –**

وهى أقرب شبهًا بالبرمجيات وأشباه الموصلات - ولهذا فهى أكثر تعرضًا للإنذارات القضائية الخاصة بالسطو. وهناك شركة من شركات البيوتك هى شركة أفيمتريكس، تواجه بالفعل مشاكل سوف تواجهها فى النهاية شركات البيولوجيا التخليقية، وقد نأت هذه الشركة بنفسها عن غالبية شركات البيوتك الأخرى وتنادى بفرض قيود على نظام براءات الاختراع. وتنتج شركة أفيمتريكس منظومات الدنا الميكروية (DNA microarrays) التى تحوى آلافًا أو ملايين السَلسَلات المختلفة. ولما كان العديد من السَلسَلات الجينية لها براءات اختراع، فإن إنتاج منظومة وحيدة من الدنا قد يتطلب حقوقًا لمئات من البراءات. ويستطيع مالك وحيد لبراءة سَلسَلة واحدة من بين آلاف السَلسَلات المستخدمة على الشيبة أن يوقف مبيعات منظومة بأكملها. وتطالب أفيمتريكس بفرض قيود على نظام براءات الاختراع فيما يخص الجينات التى تندرج تحت حماية البراءات أو على أية معلومات جينية[٢٣].

تجمع المؤسسات الكبيرة والمنظمات الصناعية صفوفها لا فى مواجهات على جانبى معارك معينة تتعلق ببراءات الاختراع فحسب وإنما تواجه بعضها بعضًا فى الجهود الرامية إلى إحداث تغيرات جوهرية فى نظام البراءات. ونتيجة لذلك، قد يعتمد الابتكار فى التقنيات البيولوجية لا على التغيرات فى تفسير قانون البراءات الحالى فحسب وإنما أيضًا على محصلة ما تنتهى إليه المناقشات الواسعة النطاق حول الملكية الفكرية. وليس من المحتمل التوصل سريعًا إلى حلول لهذه القضايا، وخاصة فى ضوء الثقل المالى والسياسى للأطراف المهتمة على جانبى النقاش.

وسوف تسهم نتائج الجدال الدائر حول دور البراءات فى تشجيع الابتكار وتثبيطه، سوف تسهم فى تحديد مسيرة التقنيات البيولوجية. ومن سوء الطالع، أن النقاش كثيرًا ما ينبنى على فكرة أنه "على النقيض من التطور الذى حدث فى البرمجيات، فإنه ليس من المحتمل أن تُمارَسَ التكنولوجيا البيولوجية فى

الجاراجات"[٢٤]. والفصول السابقة تثبت عدم صحة هذه المقولة. فالمستثمرون العاملون فى الجاراجات والشركات الكبيرة على حد سواء يتنقلون عبر غابة كثيفة من البراءات أثناء نضالهم فى سبيل الابتكار. بل إن اختيار الدخول تحت حماية البراءات فى حقيقة أمره يؤثر تأثيراً قوياً فى القدرة على المشاركة فى الأسواق.

عصر بيولوجيا الجاراجات على وشك أن يحل فوق رؤوسنا غالباً

تصلح خبرتى الشخصية أن أوردها كمثال. ففى أعقاب التعرف على العديد من الاتجاهات التى وصفتها فى هذا الكتاب وبعد توثيقها، ظننت أنه من المرجح أننا سنشاهد انتشاراً للابتكار فى التقنيات البيولوجية. ولقد حدث مراراً خلال العقد المنصرم أننى كتبت عن إمكانية - أو احتمال، أو حتى حتمية - «بيولوجيا الجاراجات» و«اختراقات البيوتك فى الجاراجات» المبنية على تخليق الدنا[٢٥]. غير أنه حدث فى نحو سنة ٢٠٠٥، أنى اكتشفت أنى لا أعرف أى شخص يدير بالفعل عملاً بهذه الطريقة. وفى ذاك الوقت خطرت لى فكرة وددت لو جربتها، وبدا لى أنها فرصة طيبة لكى أضع موضع الاختبار فرضية افترضتها وهى أن ابتكارات البيوتك ضيقة النطاق وذات التكلفة المنخفضة والتى تعتمد على التخليق لا على الطرق التقليدية الكثيفة العمالة، هذه الابتكارات ممكنة الحدوث. وبناء على خبراتى السابقة كنت متأكداً بدرجة معقولة أن المشروع قد يقدر له النجاح فى معمل أكاديمى أو شركة وممول بطريقة تقليدية. غير أنى لم أكن متأكداً عما إذا كنت قادراً على تنفيذه فى الجاراج الخاص بى. وبناءً على ذلك كان المشروع نصف شركة ناشئة ونصف مشروع فنى. وتستطيع أن تسميه نوعاً من الاقتصاد التجريبى.

ومقابل استثمار مالى بالغ الضآلة، تبين لى أنى قادر على تحقيق تقدم جوهرى فى الجاراج. غير أن الاستثمار العمالى - الإسهام بالعرق فى الأمسيات ونهايات الأسبوع وسهر الليالى - فاق بكثير تكاليف الكواشف (reagents) والأدوات. وعندما

كانت تعوزنى الخبرة، أو عندما كنت أجد أن قطعة معينة من المعدات أحتاجها باهظة الثمن، وجدت من الممكن أن أستأجر مقاولين أو أدفع مقابل استخدامها لدى شركات أكبر وراسخة. فمثلاً، استعنت بمصادر خارجية فى سبيل تخليق جين وتنقية البروتين الناتج، وهى خطوات غير هامة فى مشاريع المعامل الكبيرة ولكنها كانت ستكلفنى الكثير إذا اضطررت لدفع تكاليف كل البنية التحتية كى أبنى تلك القطعة الوحيدة الصغيرة التى صممتها. وهذه، مرة أخرى، هى الطريقة التى يسير بها كل الاقتصاد. وفى النهاية فليس بمستغرب، وخاصة مع التأكيد على كل الحجج التى سقتها على مدار هذا الكتاب، أن سطو الجاراجات - أى *ابتكارات* الجاراجات - قد دخلت فى مجال البيولوجيا.

وقد حرصت على اختيار مشروع بسيط نسبيًا - وكان فى هذه الحالة أداة لها استخداماتها فى تطبيقات متعددة - وكانت الطبيعة المحددة للمشروع سببًا فى أنى تمكنت من تخفيض التكاليف والعمل فى ساعات فراغى. وبواسطة جمع أجزاء من بروتينات موصوفة فى الدوريات العلمية نجحت فى تصميم جزىء جديد له وظائف محددة.

وإذا بدا للقارئ غموض هذا الوصف، فهو أمر مقصود، وأقدم اعتذاراتي. فنحن نواجه عقبة كأداء فى تسويق منتجات بيولوجيا سطو الجاراجات وهى الكيفية التى تستطيع بها الشركات الصغيرة المشاركة فى أسواق يهيمن عليها لاعبون أكبر حجمًا وأشد ثراءً. وفى الوقت الحالى نجد أن المحافظة على حقوق الملكية والدفاع عنها، التى هاجمها لسيج بضراوة، هى أفضل شىء، ولعلها الطريق الوحيد للتقدم.

والتحدى الذى أواجهه هو ببساطة تكاليف الحصول على براءة الاختراع. ومعنى ذلك أن تكاليف المساهمة فى السوق ليست فقط رأس المال والجهد المطلوبين لإنتاج شىء جديد بهدف بيعه؛ وإنما تشمل تكلفة حماية الملكية الفكرية المترتبة على ذلك. وأحيانًا يُطلَقُ على هذه التكاليف والتكاليف التالية الخاصة بالتفاوض مع المقاولين المختصين والحصول على التراخيص مصطلح «تكاليف الأعمال التجارية»

(transaction costs) وفى حالتى هذه كان إجمالى تكاليف رأس المال لتطوير المنتج أقل بكثير من التكاليف المبدئية للأعمال التجارية الخاصة بالتقدم للحصول على براءة اختراع.

وعلى المدى البعيد، نجد أن تكاليف التقدم للحصول على براءة اختراع فى دولة أجنبية، وتكاليف الترجمة والصيانة والتكاليف المحتملة للدفاع عن الحقوق فى المحاكم سوف ترفع تكلفة الحصول على براءة اختراع أضعافًا. وكل ذلك فى سبيل براءة واحدة فقط، ولا ريب أن التكاليف سوف ترتفع كثيرًا فى حالة التقدم للحصول على براءات أخرى فى المستقبل. فإذا نجحت شركة فى تخليق عديد من الأدوات الجديدة، أو أدوات مكونة من قطع متعددة، بعضها قد طورها شخص آخر، فقد ينتهى الأمر بأن نقع فى فخ غابة أخرى من البراءات. وليس من الصعب أن نتخيل أن التكاليف سوف تخرج عن السيطرة تمامًا. ومن البدهى أنى، على غرار أى مستثمر آخر، أتوقع أن الإيرادات المستقبلية سوف تغطى تلك التكاليف وغيرها. وعلى أية حال، لقد وصل الابتكار فى التكنولوجيا البيولوجية إلى نقطة وصلتها الصناعات الأخرى منذ زمن: وهى أن تكاليف تحقيق تقدم قد تكون أقل من تكاليف الأعمال التجارية الخاصة بحماية الملكية الفكرية التى نتجت عن هذا التقدم.

وتضعنى هذه الملاحظة فى مأزق. فالمشاركة فى السوق الحالية *تتطلب* إنفاق مبالغ مالية طائلة على براءة واحدة. فإذا كان فى الإمكان التخلى عن حماية البراءة، فإنى بإضافة تطوير إضافى متواضع يمكننى أن أشرع فى بيع أداةٍ توفر قدراتٍ كَمية فى البيولوجيا الجزيئية. ولكن الاقتصار على وصف وظائف الأداة، وهى أمر له ضرورة واضحة من وجهة نظر التسويق، فسوف أُمَكِّنُ المنافسين من أن يهندسوا الأداة عكسيًا. وعلى الرغم من أنه من الصحيح أن الاستثمارات المطلوبة فى التكنولوجيات البيولوجية قد انخفضت، فإن الصناعة لا تزال تسيطر عليها عمالقة تملك من الإمكانات المادية والمالية ما يسمح لها بأن تسوِّق بسرعة أفكارًا جديدة. وهذه هى الحقيقة التى يتوجب على مستثمرين عديدين آخرين أن يواجهوها. غير أنه بالإضافة

لأية قيود على الابتكار تفرضها أدغال البراءات والملكية كدستها العمالقة، نجد أن التركيبة الحالية للحماية التى تسبغها الملكية الفكرية وما يتعلق بها من تكاليف الأعمال التجارية تعمل دون نقاش مثل سترات المجانين المقيِّدة على المبتكرين. وتقيد هذه السترة المقيدة القدرةَ على الاستثمار فى تكنولوجيات جديدة بتحجيم القدرة على المشاركة فى الأسواق. ولكى أتمكن من دفع الإيجار فأنا مضطر إلى ارتداء هذه السترة الخاصة.

وإذن فالتكلفة الحالية للمشاركة فى الأسواق تثبط تطوير الجزء المعين من العمالة الذى يقول وليم بومول إنه النظام الأمثل لإنتاج أقصى ابتكار، كما أثبتنا فى الفصل العاشر.

وقد يبدو أن اقتصاداً مزدهراً للبيوتك، بُنِى من أسفل بواسطة الاختراعات والابتكارات التى يقوم بها المستثمرون والشركات الصغيرة، يمكن أن يفيد من تركيبة تتيح حماية أقل للأفكار تهتم برأس المال. ومن منظور آخر، نجد أن الاستثمارات فى التكنولوجيا الجديدة توفر معدلاً أعلى للربحية إذا كان الدخول إلى الأسواق يحتاج لرأس مال أقل. ولعل خلق آلية تتيح للصغار أن يشاركوا فى اقتصاد للبيوتك يهيمن عليه العمالقة، ربما بتخفيض تكاليف الأعمال التجارية، هو أمر أساسى للسماح للابتكار السريع فى التكنولوجيات البيولوجية.

مشكلة البراءات أو مشاكلها:

- من المفترض أن الهدف من البراءات هو الصالح العام بالسماح للمبتكرين باحتكارٍ مؤقتٍ على اختراعاتهم، مقابل الكشف عن هذا الاختراع، بحيث يتعلم منه آخرون. ولما كان منح حق الملكية لاختراع هو تبادل اقتصادى صريح، كثيراً ما يُنظَرُ إليه اليوم باعتباره وسيلة لتحقيق فائدة مالية كبيرة. فإن ثمة دافعاً عند المبتكرين ذوى الموارد

المالية الكبيرة لإساءة استغلال ثقة الجمهور ومحاولة خلق احتكار أكبر بكثير مما يبرره المحتوى الذى من أجله حصلوا على البراءة.

والعديد من البراءات الممنوحة، فى حقيقة الأمر، لا تتفق والمعايير التى وضعها الكونجرس ومكتب البراءات الأمريكى. وهناك دراسة حديثة تناولت البراءات الخاصة بالجينات البشرية المرتبطة بمجموعة معينة من الأمراض خَلُصَتْ إلى أن عدداً كبيراً من تلك البراءات "لا ترقى إلى مستوى القانون الفدرالى للبراءات". وقد اختيرت تلك الأمراض المعينة للدراسة، لأنها محط اهتمام الجمهور وتمثل مجالاً محدداً من المحتمل فيه أن الجينات المسببة للمشكلة يكون لها "تأثير على الرعاية الصحية عند البشر." وقد شملت الدراسة أربعًا وسبعين براءة اختراع، سُجِّلت على مدى عام، تضمنت فى مجملها ١١٦٧ مطالبة. ووصل عدد المطالبات التى بها مشاكل إلى ما يقرب من ٤٠ بالمائة منها، وبعضٌ منها يتضمن أكثر من مشكلة واحدة، وتم تعريف "المشكلات" بأنها كتابة أوصاف ناقصة وتمكين غير كافٍ؛ ومطالباتٌ لما هو أكثر مما اكتشفه المخترع؛ ومطالباتٌ لمكتشفات "لم يصفها حامل البراءة"؛ ومطالباتٌ لاستخدام اختراعات لم يأت ذكرها فى البراءة؛ ومطالبات استخدامٍ مبنية على الربط بين وجود تطفرات جينية والأمراض دون إثبات الكيفية التى يمكن بها استخدام هذه الرابطة لتشخيص المرض[٢٦].

وكثيراً ما يُستغل نظام البراءات على النحو التالى. فالكثير من طلبات التقدم للحصول على البراءات تحوى محاولات لإسباغ حماية استثنائية لأفكارٍ وقدرات تكنولوجية، وعلى وجه الخصوص بادعاء حقوق فى أفكارٍ هى معلومات شائعة فى المجال وإن كانت غير مكتوبة. غير أن الأسوأ من ذلك بالنسبة للشركات الصغيرة أن البراءات هى أدوات تحتاج باستمرار إلى موارد كى تُستغَلَّ ببراعة، بسبب تكاليف المشاركة فيها. وهو أمر يضع الاستفادة فى مصلحة الشركات الأكبر حجماً. ويضاف إلى ذلك أن النظام يتطلب أن الشركات والمستثمرين الأصغر تجد مساندة مالية لتغطية تكاليف الأعمال التجارية التى قد تكون أكبر بكثير من الرأسمال الذى يتطلبه الاختراع

والابتكار المبدئى. ومع الأخذ فى الاعتبار بالواقع السياسى الذى يقر بالتأثير الذى تتمتع به المؤسسات الكبيرة بقوة ثرائها النسبى، فإننى لا أعتقد أن هذا الموقف سوف يتغير تغيرًا جذريًا فى وقت قريب.

ولعل البراءات هى ببساطة ثمن - وهو ثمن باهظ - لممارسة الأعمال. غير أن ثمة طرقًا أخرى لحماية الملكية الفكرية، وبالتأكيد، لتنظيم الاقتصاد والأسواق. وجدير بنا أن نستكشف ما إذا كانت تلك البدائل ستسهل الابتكار فى التكنولوجيات البيولوجية بتوفير «حقوقٍ» للمبتكرين مع تخفيض تكاليف الأعمال التجارية فى نفس الوقت.

انطلاق الابتكار

أوضح أوكتاف شانوت الوسيلة منذ زمن مبكر (انظر الفصلين الثالث والخامس). ففيما يتعلق بالاقتراحات المتنافسة لبناء نظام سيطرةٍ للطائرة، وبخاصة تلك الأفكار التى تسمح بـ «التوازن التلقائى» أو «الوصول إلى الثبات التلقائى فى مواجهة الرياح»، سار شانوت على نهجه المعتاد من محاولة تكثيف تدفق المعلومات لكى يسرع بخطوات الابتكار. ففى سنة ١٩١٠ اقترح شانوت على تشارلز والكوت، سكرتير متحف سميثسونيان، برنامجًا لفحص التكنولوجيات تنتج عنه قاعدة معيارية للابتكارات المستقبلية: "تتلخص فكرتى فى جمع معلومات عن تلك الاقتراحات المختلفة (التى قدمها لانجلى والأخوان رايت وهارجريف ومونتجومرى... إلخ). وفحصهم وتجربة الاقتراحات الواعدة منها ... ثم نشر النتائج لفائدة الطيارين الذين يريدون استخدام محركات"[٢٧].

واليوم، من الممكن أن نطلق على هذه الإستراتيجية مصطلح «طيران المصادر المفتوحة»، طبقًا للظاهرة الثقافية والاقتصادية المعروفة باسم «البرمجيات مفتوحة المصدر». وعوضًا عن ذلك، يمكن أن تقع هذه الإستراتيجية تحت نطاق فئة «الابتكار المفتوح»، وهى وسيلة للابتكار التعاونى يسهم فيه المستخدمون فى تطوير منتج ما.

والمصادر المفتوحة والابتكار المفتوح هى مفاهيم مستقلة عن بعضها - وكثيرًا ما يختلط المفهومان - وسوف أناقشها فيما تبقى من فصول هذا الكتاب.

ومن البديهى أنه ليس من العدل أو توخى الدقة أن أضع جهود شانوت، فى استعراض تذكرى، فى هذا الإطار. فالمصادر المفتوحة والابتكار المفتوح هى نتاج أخريات القرن العشرين، أتاحتها أنماط جديدة من الاتصالات وظهور حقائق جديدة عن الأعمال التجارية العالمية ذات قدر عالٍ من التنافسية. ولكن بذرة الفكرة كان وجودها واضحًا - فقد فهم شانوت أن تبادل المعلومات سوف يفضى سريعًا إلى فهم فنى يؤدى بدوره إلى نشوء قاعدة لابتكارات إضافية.

ثمة مساندة جارفة ومتنامية للابتكار المفتوح فى أوساط المؤسسات الكبيرة على ظهر الكوكب. والأسباب بسيطة: فقد باتت خطوات تصميم العديد من المنتجات بالغة التعقيد، وتدفق المعلومات صار فائق السرعة وانخفضت تكلفته، بحيث إن التعاون أصبحت قيمته فى الأسواق أعلى من العمل خلف الجدران.

كانت شركة «آى بى إم» (IBM)، أو «الزرقاء الكبيرة» (Big Blue) وهو الاسم الذى اشتهرت به، ذات يوم واحدة من أنجح المؤسسات الصناعية فى العالم. وطوال الجانب الأعظم من تاريخها كانت ابتكارات الشركة فى غالبيتها من جهودها التطويرية الداخلية. واليوم تسمح الشركة بالولوج المفتوح لأغلب حاسباتها العملاقة المعقدة (super computers)، وهى تسوق للبرمجيات مفتوحة المصدر التى تحصل عليها الشركة دون مقابل ويكتب غالبيتها مبرمجون يعملون مجانًا.

لِمَ كان التغير؟ وما الذى سمح بهذه التركيبة الاقتصادية الغريبة؟ يجيب يوكاى بنكلر أستاذ القانون بجامعة هارفارد بإجابة وحيدة: "لأن «آى بى إم» لا ترى فيها أحد الاختيارات المطروحة. فهم يدركون أن العالم قد بات أسرع كثيرًا وأكثر تعقيدًا وأكثر تشابكًا من أن يتيح لأى شركة أن تعثر على كل الإجابات بداخلها"[٢٨]. وجزء من مبيعات أجهزة «آى بى إم» يدعمها انتشار استخدام برامج «لينوكس» (Linux)، أما «آى

بى إم» ذاتها فتساند لينوكس بتمويلها التطوير فى مناطق تجدها ذات نفع لها. وهكذا فى الوقت الذى تستحوذ فيه «أى بى إم» على مكاسب ضخمة يوفرها لها متطوعون، فإنها تسهم أيضًا فى المحافظة على البرنامج الذى يستخدمه هؤلاء المتطوعون وتطويره.

كيف تتمكن «أى بى إم» من الخروج بربحية من هذا النموذج؟ هم يضعون النقود فى بناء مكونات الحاسبات والحفاظ عليها وفى توفير خدمات بدلاً من مجرد إنتاج سلعٍ وبيعها، كما يعترف بصراحة لو جيرستنر رئيس مجلس إدارة «أى بى إم»: "بناء البنية التحتية هى مساهمتنا"(٢٩). ويذكر بنكلر أنه "فى الوقت الذى حشدت فيه الشركة أكبر عدد من براءات الاختراع سنويًا من ١٩٩٣ إلى ٢٠٠٤، فإنه حدث بين ٢٠٠٠ و٢٠٠٣ أن قطاع الخدمات المتعلق بلينكس انتقل من حساب لا يحقق أية عائدات إلى توفير أرباح تبلغ ضعف العائدات من كل المصادر ذات الصلة بالبراءات، لشركة كانت أكبر شركات الولايات المتحدة إنتاجًا للبراءات"(٣٠).

على الرغم من هذا العرض المبهر، فلعله يتعين النظر إلى إستراتيجية «أى بى إم» بوصفها تجربة لشركة تتعامل مع تحول اقتصادى واسع النطاق فى الولايات المتحدة بعيدًا عن التصنيع. فقد حققت «أى بى إم» تغيرًا جوهريًا من نموذج عمل مبنى على بيع أشياءٍ إلى نموذج مبنى فى المقام الأول على بيع أفكارٍ وخدمات، تشمل خدمات استشارية متعلقة بحِزَمِ برامج لينوكس التى توزعها مجانًا. وفى ٢٠٠٦ بلغت عائدات «أى بى إم» ٩١,٤ بليون دولار منها ما يقرب من ٣٥ بالمائة مستمدة من خدمات، و٢٥ بالمائة من مبيعات الأجهزة، و٢٠ بالمائة من مبيعات البرمجيات، والباقى من عمليات مالية(٣١).

ويرى كنيث مورس مدير مركز رجال الأعمال التابع لمعهد التكنولوجيا بماساتشوستس (MIT) رأيًا فى سلوكيات «أى بى إم» أشد سخرية: "إنهم منفتحون فقط فى أسواق البرمجيات حيث وضح تخلفهم. أما فى سوق الأجهزة، حيث لهم قصب

السبق، فهم فى أشد حالات الانغلاق."[٣٢]. ولا تزال الشركة تطارد البراءات فى المجالات التى يمكن أن تكون مفيدة على المدى البعيد، مثل المواد المتقدمة[٣٣]. وعلى الرغم من ذلك، على الأقل فى الوقت الراهن، يبدو أن «أى بى إم» تتربح بسخاء من تحولها المنتقى إلى فتح المجال للابتكار.

وإستراتيجية «أى بى إم» هى إحدى صور «الابتكار المفتوح»، وهو مفهوم أيده هنرى تشسبرو الأستاذ بجامعة كاليفورنيا ببيركلى التى تحولت إلى ما يشبه تعويذة الأعمال التجارية فى السنوات القليلة الماضية[٣٤]. ويبدأ تشسبرو بأن يحدد التركيبة الذهنية لـ «الابتكار المغلق»، التى تعتبر أن «الابتكار الناجح يحتاج إلى سيطرة" – سيطرة على الأفكار والتصميم والتصنيع والمبيعات والخدمات والتمويل والدعم[٣٥]. ويؤكد تشسبرو أن هذا النموذج لم يعد صالحًا بسبب تجمع عدد من العوامل، منها تنقل العمالة المدربة، وتوفر رأس المال اللازم لتمويل المبتكرين المتنافسين، وتقلص الوقت اللازم لتسويق المنتجات الجديدة وقِصر عمرها، وتزايد أعداد الزبائن والموردين حسنى الاطلاع، والمنافسة الدولية[٣٦]. وعلى النقيض من ذلك، نجد أن «الابتكار المفتوح» هو "صيغة تفترض أن الشركات تستطيع، ويتعين عليها، أن تستغل الأفكار الخارجية مثلما تستغل الأفكار الداخلية، وكذلك تستخدم المسارات الخارجية إلى الأسواق مثلما تستخدم المسارات الداخلية، أثناء بحث الشركة عن وسائل لتحسين تكنولوجياتها"[٣٧].

وثمة شركة كبيرة هى بروكتور آند جامبل تعتنق تلك الأفكار. فطوال السنوات العشر الماضية ازداد تطلع الشركة إلى خارجها، وتزايدت نسبة المنتجات المستمدة من أفكار خارجية من أقل من خُمسها حتى وصلت أكثر من نصفها. وبواسطة هذه الصورة من صور الابتكار المفتوح، نمت الشركة بمعدلات بلغت ٦ بالمائة سنويًا، وضاعفت أرباحها السنوية ثلاثة أضعاف فبلغت ٨,٦ بلايين دولار، وانخفضت نسبة فشل المنتجات الجديدة من ٨٠ بالمائة إلى أقل من ٥٠ بالمائة[٣٨].

ويعدد كتاب تشسبرو «الابتكار المفتوح، الحتمية الجديدة لخلق التكنولوجيا والإفادة منها»، يعدد أمثلة على أن تدفق كمٍ أكبر من المعلومات من وإلى الشركات تنتج عنه عائدات أكبر[٣٩]. وثمة بديل آخر لتلك الأفكار هو «الابتكار الذى يقوده المستخدم»، والذى أرخ له إريك فون هيبل الأستاذ بمدرسة سلون لإدارة الأعمال بمعهد «إم آى تى». ويتناول الابتكار الذى يقوده المستخدم محادثات واضحة المعالم مع الزبائن لا لإنتاج المنتَج الذى يفضلونه فحسب وإنما أيضًا لتسهيل التسويق: "يمكن لشبكات المستخدمين الذين يتسمون بعنف انتقاداتهم أن تساعد الشركات على التخلص السريع من الأفكار السيئة، والتى تؤدى بذلك إلى الإخفاق السريع"[٤٠]. مما يعود بنا إلى شانوت واقتراحاته بالسعى وراء إنتاج ابتكارات أسرع عن طريق التعاون.

بيد أن كل ذلك وكأنه ثورة أقل فى الابتكار وأقرب إلى تحسن فى أساليب التسويق، أو لعله نموذج لممارسة أفضل للأعمال التجارية. ومما لا ريب فيه أن النماذج الجديدة للأعمال التجارية تشتمل على الابتكار، ولكنها موجهة فى المقام الأول لخدمة القدرات التنافسية من خلال تحسين الإنتاجية أو خدمات العملاء، فى الوقت الذى تحافظ فيه على العلاقات التركيبية التقليدية بين الزبائن والمنتجين. وأؤكد أننى لا أقصد أن أقلل من شأن النماذج الجديدة للعمل التجارى فى رعايتها للابتكار فى التكنولوجيات البيولوجية وتعزيزها لها، ويشكل «الابتكار الذى يقوده المستخدم» الذى أتى به فون هيبل جزءًا من ظاهرة أكبر هى دمقرطة الابتكار، وهى سمة واضحة لهذا الكتاب. غير أنه ما من نقاش مما أوردناه سابقًا يتناول بحق حقيقة أن «الحق الحصرى» التى يُعَبَّرُ عنها حاليًا فى قانون البراءات ربما يعوق الابتكار فى التكنولوجيات البيولوجية. وعلى النقيض من ذلك، نجد أن البرمجيات المفتوحة المصدر هى مثال على تحول جوهرى فى تركيبة الإنتاج، سهلت منها إعادة تصور «الحقوق الحصرية»، وهو إعادة تصور سوف نتعلم منها ما الذى نحتاجه لتجنب الجمود فى البيولوجيا.

«ظاهرة مذهلة»

تشكل البرمجيات المفتوحة المصدر تحديات هائلة لنماذج الإنتاج التقليدية من اقتصادية وتنظيمية. وكتب بنكلر بحثًا أصيلاً عن ظاهرة المصادر المفتوحة وقال،

> **فى قلب الآلة الاقتصادية لأعظم اقتصادات العالم تقدمًا، وفى اقتصاد الولايات المتحدة على وجه الخصوص، بدأنا نلحظ ظاهرة جسورة ومثابرة، ومذهلة. فقد ضرب نموذج جديد للإنتاج بجذوره، وهو نموذج لا يجب أن يوجد، على الأقل وفقًا لأكثر معتقداتنا فى سلوكيات الاقتصاد شيوعًا. وبدهيات الأمريكيين فى أخريات القرن العشرين ترفض فكرة أن آلافًا من المتطوعين يمكن أن يتعاونوا فى مشروع اقتصادى معقد. ولا ريب أنه من غير المسموح لهؤلاء المتطوعين أن يهزموا أكبر المشاريع فى العالم وأكثرها تمويلاً فى ملعبها. وعلى الرغم من ذلك، فإن ذلك هو الحادث فعلاً فى صناعة البرمجيات(٤١).**

ويعتقد بنكلر أن نمطًا جديدًا من الإنتاج يبزغ فى العالم المتشابك، وهو «إنتاجٌ (على مستوى) شيوخ المهنة مبنىٌ على (جهد) العوام»، وأحد أمثلته هو البرمجيات المفتوحة المصدر. "والسمة المميزة الأساسية" لهذا النمط الجديد من الإنتاج هى أن "هذه المجاميع من الأشخاص قد تعاونت بنجاح فى مشاريع واسعة النطاق متتبعةً تجمعات متنوعة من الدوافع التحفيزية والإشارات الاجتماعية بدلاً من أسعار السوق أو الأوامر الإدارية"(٤٢).

هذه «الدوافع التحفيزية» التى تقف وراء حركة البرمجيات المفتوحة المصدر بصفة خاصة لها جذور عملية وإيديولوجية، ولن أقول عنها هنا إلا أقل القليل. فليس هدفى أن أسرد تاريخ حركة المصدر المفتوح، أو أتدارس الشخصيات المشاركة فيها، ولا أن أستكشف الظروف التى أدت إلى نشأة حزمٍ معينةٍ من البرمجيات أو التنظيمات الاجتماعية. ولا هدفى أن أستكشف كل الوسائل التى تلجأ إليها المصادر المفتوحة كى تحقق ربحية من البرمجيات، وإنما هدفى أن أستكشف (١) ما الذى يجعل

البرمجيات المفتوحة المصدر، والإنتاج على مستوى شيوخ المهنة بصفة عامة، مصدراً للابتكار. و(٢) ما إذا كان النموذج قابلاً للنقل إلى تطوير التكنولوجيا البيولوجية والاقتصاد البيولوجي. وبوصفي من المستثمرين بصفة خاصة، وباعتباري شخصاً يهتم بسرعة الابتكار بصفة أكثر عمومية، أود أن أحاول فهم ما إذا كانت ثمة دروس مستفادة من البرمجيات مفتوحة المصدر تساعدني على تطوير تقنيات بيولوجية بسرعة وتكون آمنة.

إن سمة البرمجيات مفتوحة المصدر ذات الصلة الوثيقة بهذا الكتاب وبمستقبل التكنولوجيات البيولوجية، هي أنها أكثر بكثير من أن تكون مجرد وصف لمنتج بعينه من منتجات البرمجيات، أو حزمة معينة من البرامج، بل حتى هي أكثر من مجموعة من التراخيص التي تتحكم في نقل حقوق الملكية الفكرية للشفرات. والمصادر المفتوحة هي في جوهرها نموذج جديد للإنتاج، يعتمد بشدة في الوقت الحالي على تفسير معين لحقوق الأشخاص التي تكتب الشفرات وتستخدمها.

الأسس القانونية للبرمجيات مفتوحة المصدر بوصفها مشاعاً

تعتمد ظاهرة البرمجيات مفتوحة المصدر، من الناحية العملية، ووفقاً لصورتها في الوقت الراهن في العالم، في الجانب الأعظم منها على وجود «لينوكس» :Linux » و«بي إس دي» (BSD) ، وهما صورتان من صور أنظمة «يونيكس» للتشغيل (Unix) التي يمكن استخدامها مجاناً ويمكن تحويرها وفق الرغبة. وإذا كانت مادة البرمجيات مفتوحة المصدر التي يتم استخدامها وتحسينها على المشاع تشتمل على أكواد مستمدة من لينوكس وبي إس دي، فإن القواعد التي تتحكم فيها - أو في حقيقة الأمر تتطلبها - المشاركة في المشاع هي على درجة من الأهمية لا تقل عن أهمية الأكواد ذاتها[٤٣]. ونظام الملكية الفكرية، كما يحدده ستيف وبر أستاذ العلوم السياسية بجامعة كاليفورنيا في بيركلي، هذا النظام الذي يساند البرمجيات مفتوحة المصدر

"يستمد شكله من مجموعة من «التراخيص» المكتوبة فى غالبيتها باللغة التقليدية للوثائق القانونية ... ولننظر إلى هذه التراخيص بوصفها تُكَوِّنُ تركيبة اجتماعية للبرمجيات مفتوحة المصدر. وفى ظل غياب شركات تعمل كوسيلة لتلقى الطلبات، فإن أنظمة الترخيص هى، فى حقيقة الأمر، التركيبة الاجتماعية الرئيسية المحيطة بالمصادر المفتوحة[٤٢].

وباختصار شديد، تنبنى التراخيص المفتوحة المصدر على حق ملكية الأكواد. والمالك الأصلى للبراءة، أى الشخص الذى كتب الكود الأصلى، يحدد شروط الاستخدام بإطلاق ذلك الكود تحت رخصة معينة. وبدون وجود حقوق ملكية، والتى يمنحها فى هذه الحالة حق الملكية الفكرية، فإن التعاقدات التى تتيح استخدام الكود وتوزيعه يتعين أن تُنظم بنظام كل حالة على حدة. والموقف الآن، أنه إذا أردتَ، أى المستخدم، أن تحصل على الكود المصدرى وتقرأه، فإن عليك أن توافق بوضوح على شروط الترخيص. وعادة ما تفرق الرخصة بين الاستخدام والتوزيع. فإذا ما حصلت على الكود تحت رخصة مفتوحة المصدر، فإنك بصورة عامة، تستخدمه حسبما يتراءى لك لأغراضك الشخصية، بما فى ذلك إمكانية تغيير الكود. غير أن الرخص عادة ما تشترط أنك إذا وزعتَ الكود المعدل بأى صورة من الصور، فإنك ملزم من الناحية التعاقدية بأن تتيح الكود المعدل تحت مظلة الترخيص الأصلى. وبهذا تضمن التراخيص مصدرًا مشاعًا دائم التمدد، وهى سمة يُطلق عليها أحيانًا «فيروسية» بمعنى أن التشارك فى الكود المصدرى يؤدى إلى مزيد من التشارك. كما يُطلق أيضًا على الحق الحصرى الذى تمنحه البراءة لضمان الانتشار الفيروسى للكود «حق اللاملكية(*)».

(*) الكلمة فى الأصل الإنجليزى هى (copyleft)، وهى تفكهة مقصود بها اللعب بالمضادات أى مضاد كلمة (copyright)، وقد فضلت أن أترجمها وفقًا للمعنى الذى يقصده المؤلف. (المترجم)

وتتجلى فى التو التوابع التجارية لتلك الإستراتيجية. فبعد أن تستثمر وقتك ومواردك المالية فى تحسين كود من الأكواد يقع تحت حماية رخصة ما بحق اللاملكية، يتوجب عليك أن تتخلى عن المنتج، حتى ولو كان بإمكانك أن تطالب بحق ملكية عن جزء من الكود المعدل. ولا تنص غالبية رخص حقوق اللاملكية على إمكانية التشارك مع المالك الأصلى للكود فى الأرباح الناتجة عن بيع الكود. وبهذا فإن الأحجية التى تواجه الاقتصاديين والمحامين الذين يتخصصون فى الملكية الفكرية هى: ما الذى يحمل شخصًا ما على المساهمة فى مشروع مساهمة مجانية بينما يحقق آخرون أرباحًا من جراء مساهمته تلك؟ ويتناول ستيف وبر هذه المعضلة بإيجاز قائلاً: "يبدو أن المنطق الاقتصادى الصارم يقوض أسس لينوكس، وبالتالى يجعله مستحيلاً."[٤٤]. ومن البدهى أن ثمة حلاً واضحًا هو القول بأن المنطق الاقتصادى المعيارى قاصر عن أن يتعامل مع الظاهرة الجديدة.

التأثير الاقتصادى للمصادر المفتوحة

فى كتابه «نجاح المصادر المفتوحة»، عمد ستيف وبر إلى تبنى وجهة النظر التنويرية بأن: "المصادر المفتوحة هى تجربة فى بناء اقتصاد سياسى - بمعنى أنها نظام مستديم لخلق قيمة مادية مع مجموعة من الآليات الحكومية. وفى هذه الحالة يتولى النظام الحكومى تجميع مجتمع من المنتجين حول هذه الفكرة المعارضة للحدس والتخمين والخاصة بحقوق الملكية عند التوزيع. كما أنها أيضًا اقتصاد سياسى يصب فى مجال واسع من الدوافع الإنسانية ويعتمد على مجموعة من التركيبات المؤسساتية الخلاقة والمتطورة تعمل على تنسيق السلوكيات"[٤٥].

و«النظام المستديم لخلق قيمة مادية» له طبيعة اجتماعية ومالية، ويبدو أن التجربة ناجحة. ومشاع البرمجيات المتنامى هو مصدر مشترك يستطيع أى شخص أن يسحب منه ويضيف إليه. ووجود هذه البرمجيات يتيح نشأة ثروات حقيقية على صورة وظائف

وبلايين من العائدات من مبيعات البرمجيات والأجهزة. وهذه الأجهزة والبرمجيات يمكن أن تعمل كبنية تحتية لجانب كبير من الاقتصاد ككل.

أى شخص يستخدم جوجل كمحرك بحث يعتمد على ما يربو على مائة ألف خادم تعمل بنظام لينوكس[٤٦]. ونتائج بحث جوجل نفسها هى أمثلة على ما سماه بنكلر إنتاج شيوخ المهنة: فاللوغارتمات التى تحدد ترتيب نتائج بحث جوجل "تعتمد على الطبيعة الديمقراطية التى تنفرد بها الشبكة العنكبوتية باستخدام تركيبات الوصل الهائلة كمؤشر على قيمة كل صفحة"[٤٧]. وتتسم البرمجيات المفتوحة المصدر باتساع مداها. ويقول ديرك هوندل كبير التقنيين المختصين بالمصادر المفتوحة بشركة إنتل، "من بين أسرع ٥٠٠ حاسبة فائقة فى العالم، يعمل حاليًا أكثر من نصفها على برنامج لينوكس"[٤٨]. كما تحافظ المصادر المفتوحة على سيطرتها فى قطاعات خدمية عادية؛ وما بين نصف وثلاثة أرباع الحاسبات الخادمة المتصلة بالشبكة تعمل على برمجيات مفتوحة المصدر، وفقًا للشهر والرقم اللذين تبحث عنهما[٤٩]. وفيما يتعلق بشركة أى بى إم (الأزرق الكبير)، فبالإضافة إلى العائدات من الخدمات المرتبطة بلينوكس، تحقق الشركة وفورات مقدارها ٤٠٠ مليون دولار سنويًا باعتمادها على لينوكس[٥٠].

والتأثيرات الاقتصادية الأوسع مجالاً هى تأثيرات هائلة، ولعلنا لا نشاهد إلا قمة جبل الجليد. وثمة تقرير حديث صدر عن اللجنة الأوربية وجد أن تغيير الأكواد المفتوحة المصدر المستخدمة حاليًا فى الشركات الأوروبية يتكلف حوالى ١٨ بليون دولار وأن قاعدة الأكواد قد تضاعفت كل ١٨ إلى ٢٤ شهرًا على مدى السنوات الثمانى الماضية[٥١]. ووجد التقرير أيضًا أن نسبة الاقتصاد المرتبط بالبرمجيات المفتوحة المصادر والمساهم فيها قد يصل إلى ٤ بالمائة من الناتج القومى العام الأوربى بحلول سنة ٢٠١٠.

وتنبنى هذه القيمة الاقتصادية الاستثنائية على استخدام المبرمجين لترخيصات تخفض بوضوح تكاليف الأعمال التجارية أو تلغيها تمامًا لكل المعنيين. ولينوكس هو مصدر مشاع يستطيع أى شخص أن يستخدمه بدون تكاليف تقريبًا. والأمر ذو الصلة

الوثيقة هنا، والسبب فى أن كثيراً من المبرمجين يحسون بالراحة عند إسهامهم بأكواد فى المشـاع، ليس أن الكود مجـانى وإنما لأن الترخـيص فى جوهره يمنح كل شـخص فرصة متساوية للاستفادة (ماليًا أو بأى طريق آخر) بالمساهمة فى الأكواد وتعبئتها وتوزيعها. وفى حين تحدد بعض التراخيص الكيفية التى تعود بها القيمة الاقتصادية للأكواد المفتوحة المصدر إلى صاحب الملكية الفكرية، إلا أن غالبية المبالغ المالية الهائلة التى تُجنى ببيع البرمجيات المفتوحة المصدر واستخدامها ليست من الحقوق الشرعية لأولئك الذين كتبوا الأكواد. ويضـاف إلى ذلك أنه من الجلى أن المؤسسـات الكبيـرة تحقق استفادة عندما تدعم العمالة الضرورية والبنية التحتية المادية عندما تتبرع بشىء له قيمة، ومن الواضح أن المؤسسات تحقق أموالاً طائلة من مصادر ابتكرها ورعاها أشخاص آخرون.

تموج الدوريات العلمية الخاصة بالمصادر المفتوحة بالعديد من التفاسير لهذه الظاهرة. وأحدها يقرر أن المبرمجين ربما يتحصلون على رأس المال الاجتماعى - أى الشهرة - من إسهامهم بالأكواد. وقد تكون مجرد المتعة التى يفوزون بها من إسهامهم بالأكواد تفسيرًا آخر. غير أن ثمة تفسيرًا آخر هو أن الشركات والحكومات والمؤسسات تدفع ثمن تطوير أكواد مفتوحة المصدر، ثم وعلى الرغم من أنها مطلوب منها أن تتبرع بها مجانًا، فإنها تستغل هذه الأكواد فى خلق مكاسب أخرى.

وثمة باعث فى «رخصة البراءات العمومية» (General Public License) والذى تحت مظلته يتم توزيع جانب كبير من البرمجيات المفتوحة المصدر، هو التأكيد على أن من حق الشخص الذى ألَّفَ الكود أن يتخلص منه كيفما شاء أو شاءت. وبهذا تكون البرمجيات المفتوحة المصدر «الحرة»، كما يقول ريتشارد ستولمان، رئيس مؤسسة البرمجيات المفتوحة المصدر، هى "حرة مثل حرية الكلام، وليس معناها أنها مجانية(*). وحرية البرمجيات تعنى حرية المستخدمين فى تشغيل البرنامج ونسخه وتوزيعه

(*) يستخدم الأصل الإنجليزى كلمة (free) بمعنييها «الحرة» و«المجانية». (المترجم)

ودراسته وتغييره وتحسينه."(٥٢). وكان ستولمان قد كتب الصورة الأصلية من «رخصة البراءات العمومية» سنة ١٩٨٩(٥٣).

على النقيض من ذلك، نجد أن لينوس تورفالدز، الذى أصدر النسخة الأولى من البرنامج الذى صار يُعرف باسم لينوكس، يجاهر باهتمامه بالعملية: "أظن أن الأمر الأكثر إثارة للاهتمام من مجرد الحديث عن «الحرية» وعن الإيديولوجيا هو الكيفية التى تخلق فيها المصادر المفتوحة الفرص لأداء أفضل لممارسة تكنولوجيا معقدة"(٥٤).

وبغض النظر عن الدوافع المحددة، وفى مواجهة التاريخ العريض والبطش الاقتصادى، نجد أن مؤيدى المصادر المفتوحة قد أكدوا حقهم فى أن يمارسوا شيئًا مختلفًا. وقد تحقق ذلك. فالمصادر المفتوحة ليست موجودة فحسب، وإنما هى شهادة على عبقرية المبتكرين ومرونة المؤسسات وقوانين الدول حول العالم. وهو نجاح يتحقق على الرغم من حقيقة أن القوانين والسوابق القضائية التى تحدد القيمة الاقتصادية "أبعد ما تكون عن الكمال".

اختراق النظام

وبناءً على ذلك، ومع احترامى الفائق، أقرر أن «رخصة البراءات العمومية» وتركيبة المصادر المفتوحة تبدو لى أحيانًا أنها اختراق للنظام. ومعنى ذلك أنه نظرًا لوجود تراكمات من القوانين وأحكام القضاء - التى تشكل حزمة من قواعد تنظيم السوق مرتبطة بقوانين موجودة مسبقًا بهدف إضفاء الحماية لتكنولوجيا لم تدر فى خلد المؤلفين الأصليين للدستور الأمريكى - فإنه لا وجود لحلول منطقية مرتبة سواء لحماية البرمجيات والخوارزميات بوصفها ملكية فكرية أو للتأكد من بقائها متاحة للجميع على المشاع. وعوضًا عن ذلك، عمد ريتشارد ستولمان وآخرون إلى بناء آلية بالغة البراعة للحفاظ على حقهم - حريتهم - لا فى أن يفعلوا ما يشاءون فحسب بالأكواد التى

يؤلفونها وإنما أيضًا لكى ينصوا علىْ أن الآخرين الذين يستخدمون عملهم يتشاركون فى النتائج. ويبدو أنه اختراق رائع ومرغوب.

وإذا ما نظرنا إليها بوصفها تقنية اجتماعية اقتصادية، نجد أن المصادر المفتوحة تخترق الأسواق بسرعة، ويتم تبنيها بمعدلات تفوق ما حدث للعديد من التكنولوجيات الأخرى على مدار القرن الفائت (أنظر الفصل الخامس). وإذن يمكننا القول إن استخدام الملكية الفكرية وقانون التعاقد لحماية حق المبتكرين فى تحديد كيفية استخدام أكوادهم هو من أجمل الاختراقات وأنجحها وأكثرها ثباتًا فى تاريخ الحاسبات.

وكما يستطيع أى شخص مارس كتابة الأكواد أن يشهد، نجد أن الاختراقات يمكن أن تُدمج فى صلب البرمجيات، مع استحالة إخراجها أو توثيق وجودها بدقة، وبالتالى يتعذر فهمها أو وصفها بدقة. وتبدأ الاختراقات عملها أحيانًا عند محاولة التخلص منها أو عند إصلاح عطب ما. وليس معنى ذلك أن الاختراقات أمر سيئ بالضرورة ولا أن الأكواد يتحتم إعادة كتابتها بالكامل. والاختراقات فيها الكفاية: فهى تؤدى عملاً. ونجد أن نفس هذه الظاهرة مألوفة لدى أولئك الذين يعملون على إنتاج اختراقات للأجهزة والمنازل والسيارات والزوارق.

ولعله من الأوفق أن ننظر إلى «مكتب البراءات العامة» والبرمجيات مفتوحة المصدر لا بوصفها اختراقات للأكواد وإنما باعتبارها اختراقات لنظامنا الاجتماعى الاقتصادى. وهذه الاختراقات تؤدى عملها بمنتهى *الكفاءة* ليس فقط كمنصة انطلاق للابتكار بواسطة مطورى البرمجيات وإنما أيضًا بما تضيفه من قيمة هائلة قابلة القياس للاقتصاد ككل.

وهذا يثير أمامى أحجية أخرى، أو على الأقل ما يبدو كذلك، لأن الاختراقات تعمل عملها كنتيجة لنفس الإعلان عن حقوق الملكية الصريحة الذى أثار قلق لورنس لسيج. وحل هذه الأحجية يكمن فى التأكيد على «المشاع» الذى يمكن المساهمة فيه بسهولة

ويسر. إن التأسيس الناجح (والدفاع عنه، حتى الآن) لمشاعٍ للبرمجيات لا يقلل فى كثير أو قليل من أهمية حجج لسيج الخاصة بإقامة سياج حول المصادر العامة بوصفها ملكية خاصة. غير أنه يلقى الأضواء أيضًا على أهمية منح المبتكرين بعض الوسائل التى تكفل لهم تأكيد حقوقهم على نواتج جهدهم *بشروطهم الخاصة*. ومهد قرار الكونجرس الأمريكى بمد مظلة حماية الحقوق الفكرية بحيث تشمل الأكواد، أساسًا لبناء أية التزامات (تشريعية) تعاقدية يودها المرء. ويشكل نموذج المصادر المفتوحة أرضية وسطية بين تطوير تكنولوجيات الملكية ووضع المعلومات فى نطاق الملكية العامة وإتاحتها مجانًا للاستخدام العام بواسطة أى شخص.

وبالنسبة لى، فإن السمة الأكثر جاذبية لهذه التركيبة ليست الفروقات بين المصادر المفتوحة وتطوير الملكية، والتى يبدو أنها تشغل بال كل المعلقين، وإنما الفرق بين المصادر المفتوحة و«الكشف المجانى». فلم يحدث قط أن وجدت حواجز تحول دون أن يتمكن ستولمان أو تورفالدز من وضع أكوادهم فى النطاق العام. وكان من الممكن أن تصبح هذه الأكواد جزءًا من مشاع، تتم المحافظة عليه وتحسينه بمرور الوقت. غير أن حق الملكية على الكود المفهوم ضمنيًا كان يمكن أن يمنع الاستخدام الأوسع نطاقًا وكان بمقدوره أن يخلق ستارًا كثيفًا سريع النمو من حقوق الملكية كان يتعين على كل المطورين أن يتحايلوا عليه. وعلى النقيض من ذلك، يوفر مكتب البراءات العامة وسيلة يتعاون فيها الناس لينشئوا حديقة تخدم احتياجات كل من يود المساهمة. أما استراتيجية 'حق اللاملكية' الفيروسى فلا تمنع أحدًا من بيع كود موجود فى المشاع، ولكنه يتيح للمطورين أن يشترطوا أن أية تحسينات تبقى متاحة للجميع، إن كان جهدهم يصلح أساسًا للتحسينات.

ومن وجهة نظرى، أرى أن ثمة ثلاثة عوامل تسهم فى الاستفادة من الاختراقات الاجتماعية الاقتصادية للمصادر المفتوحة وهى: (١) الإعلان الواضح عن مشاعية البرمجيات كمصدر يحافَظُ عليه ويعزَّز، (٢) نشأة الرخص التى تضمن حقوق المبتكر

وتعمل فى ذات الوقت على تخفيض تكاليف الأعمال التجارية والسماح للجميع باستخدام المشاع إما كمنتجين أو مستهلكين، (٣) التكاليف المنخفضة لرأس المال والعمالة الضرورية لخلق ونسخ الأجزاء. ولقد حدث الاختراق من خلال أنظمة التوقعات الاجتماعية الاقتصادية الحالية حول سلوكيات الناس والأسواق ولم يكن أحد يتوقعها وكان من الصعب تفسيرها فى بادئ الأمر. غير أن القوانين لم تتغير من أجل السماح للبرمجيات المفتوحة المصدر بالعمل، ولم يحدث أن أساتذة الاقتصاد والقانون أو العلوم السياسية فقدوا أعمالهم عندما ظهرت البرمجيات المفتوحة المصادر. بل حدثت، على النقيض من ذلك، وفرة فى القيمة الاقتصادية والوظائف وعطاء الأساتذة وكلها نتائج مباشرة للبرمجيات المفتوحة المصدر.

ويدعى بروس بيرينز، وهو من المشاركين الأوائل فى حركة البرمجيات مفتوحة المصدر، أنه ليس فى الأمر سر فى الحقيقة، فالأكواد مفتوحة المصدر والتراخيص المصاحبة لها هى نتاج محاولات المبرمجين فتح ثغرة جديدة فى اقتصاديات السوق: "يمكن تفسير المصادر المفتوحة كليةً داخل إطار الاقتصادات التقليدية للأسواق المفتوحة ... فالمصادر المفتوحة لديها اكتفاء ذاتى، ولها أسس اقتصادية تعمل وفق أسلوب رأسمالى. وهى لا تحتاج إلى أى نوع من الشعوذة الاقتصادية لشرحها. وهى مكون من مكونات اقتصاد السوق الحر مفيد أيما إفادة، بسبب الأعداد الغفيرة من الأشخاص والشركات التى يتيح لها أن تضع إسهاماتها الاقتصادية الشخصية"[٥٥]. وهذا يشير إلى الأعمال المفتوحة المصدر على وجه التحديد لأنها توفر سبلاً للناس كى يساهموا بشروطهم الخاصة، حتى ولو لم تكن تلك التنظيمات واضحة الفهم وفقًا للشروط التقليدية للتسعير. ونتذكر ما ناقشناه فى الفصل العاشر من أن علوم الاقتصاد التقليدية لا تقدر الابتكار حق قدره؛ بينما المصادر المفتوحة تعمل بكفاءة لأنها تعطى قيمة لعملية الابتكار وتتيح للمبتكرين أن يضعوا الشروط التى بموجبها يستخدم الآخرون حقوقهم الحصرية.

ولهذا، وكما تنبأ وليم بومول بالضبط (انظر الفصل العاشر)، فإن رجال الأعمال المبتكرين هم "الموردون الاقتصاديون للابتكارات الاختراقية فى الاقتصاد" وفيها لا تتركب هذه الاختراقات من مجرد أكواد فحسب وإنما تتضمن أيضًا التركيبة الاقتصادية الاجتماعية الجديدة للمصادر المفتوحة(٥٦).

ويتوسع بيرينز فى مدى تفسيراته الاقتصادية ويصل بها إلى مجالات خارج نطاق البرمجيات، ويضع سؤالاً ثم يجيب عنه "إذا كانت المصادر المفتوحة تحقق الهدف منها، فلماذا لا نبنى جميعًا سياراتنا؟".

> تحقق صيغة المصادر المفتوحة الهدف منها بجدارة فى منتجات عديدة حين تكمن القيمة الرئيسية للمنتج فى تصميمه. وقد حققت أعظم نجاحاتها حتى اليوم فى البرمجيات، وفى موسوعة، وفى تصاميم الدوائر المدمجة.
>
> ويتم تصميم الدوائر المدمجة فى جهاز خاص تتم برمجته بالتصميم المطلوب فينتج الدوائر المدمجة فى التو. ويشكل ذلك مثالاً لمجال تكون فيه الأجهزة تشبه البرمجيات تمام الشبه.
>
> غير أن غالبية الأشياء ليست برمجيات. فنسخ نسخة من جزء من برنامج لا يتكلف إلا ملاليم، بينما يحتاج الأمر إلى رطل من الدقيق كى تصنع منه رغيفًا. ولابد أن يوجد شخص ليزرع القمح ثم يطحنه إلى دقيق، وكل تلك الجهود تحتاج لمن يدفع قيمتها.
>
> ومن الطبيعى أن السيارات أشد تعقيدًا من الرغيف، ويتطلب الأمر العديد من الخطوات المعقدة والأجهزة الغالية الثمن لكى تصنع سيارات. وتخيل أنك لكى تصنع محركًا كهربيًا تحتاج لأن تنقب عن المعادن فى المناجم ثم تنقى المعدن، ثم تصنع سلكًا وقطعًا معدنية وتصب كراسى التحميل، ثم تُجَمِّعُ كل تلك القطع حسب الشكل المطلوب بالضبط. فلا عجب إذن أن الأمر يتطلب كل طاقات الاقتصاد لكى تصنع سيارة، بينما يستطيع فرد واحد أن ينتج قطعة مهمة من منتجات البرمجيات.

وعندما يحين اليوم الذى نتمكن فيه أن نصنع منتجات معقدة بصنع تصميماتها ثم توجيه آلة كى تصنعها من مواد خام بسيطة وكهرباء، فإن الاقتصاد سوف يتغير تغيرًا جذريًا. واليوم نقتصر على إنتاج قطع فردية بآلات خراطة يسيطر عليها الحاسب الآلى، وهى عملية بطيئة وقذرة لا تزال تحتاج تدخلاً يدويًا. ولقد تطور مجتمع صحى للمصادر المفتوحة حول تلك الآلات، وبدأنا نشهد هذا المجتمع يشارك فى تصميم القطع. غير أنه يتوجب على علم التصنيع الذى يسيطر عليه الحاسب أن يتطور تطورًا هائلاً قبل أن تصبح لدينا «سيارات ذات مصادر مفتوحة»(٥٧).

وماذا عن اليوم الذى سوف نصنع فيه منتجات بيولوجية معقدة بأن نوجه آلة لتخليق دارة جينية مصممة حديثًا، ثم نستخدم كائنًا حيًا لتشغيل الدارة، وبذلك ننتج شيئًا جديدًا أو مادة جديدة مستخدمين مواد خام سهلة الحصول عليها وأشعة الشمس؟ وهذا اليوم، كما يحدثنا هذا الكتاب، موجود هنا. وترسخ هذه الملاحظة الأرضية اللازمة لتفحص إلى أى مدى يمكن لتطوير التكنولوجيات البيولوجية أن تفيد من المصادر المفتوحة المدعومة باختراقات الابتكار التى يقوم بها المستثمرون.

والمصادر المفتوحة، بالصورة التى شرحناها بها حتى الآن، ممكنة من الناحية العملية بسبب عوامل اقتصادية. ومما لا ريب فيه أنه لولا المساهمة التطوعية للمبرمجين، والتركيبة التنظيمية الرائعة التى يعملون من خلالها، لما قُدِّر للمنتَج نفسه أن يوجد. ولكن خلق المنتَج وتوزيعه يعتمد على التكلفة المنخفضة لكتابة الأكواد ونسخها وعلى التكاليف المتدنية (أو المعدومة) للأعمال التجارية لنقل حق استخدام الكود.

أول مرة سمعت فيها بمصطلح «بيولوجيا المصادر المفتوحة» كانت فى أخريات تسعينيات القرن الماضى من درو إندى وهو زميل لى فى معهد العلوم الجزيئية. وقررت نحو سنة ٢٠٠٠، منبهرًا بالنجاح المتنامى للبرمجيات المفتوحة المصدر، وإدراكى

لتـأثيـرات البـراءات على الابتكارات البـيـولوجـيـة، قـررت أن أفـهـم كـيف يمكن لفكرة المصـادر المفتـوحة أن تُستَخدَم فى الإسـراع بوتيرة الابتكارات فى البيـولوجيا(٨). وسوف أناقش فى الفصل التالى ماهية البيولوجيا المفتوحة المصدر، ومن الذى يفكر فيها، وكيف يمكن تحقيقها ووضعها فى موضعها الصحيح.

الفصل الثالث عشر

البيولوجيا مفتوحة المصادر أم البيولوجيا المفتوحة ؟

تشهد التقنيات البيولوجية تغيرات أُسية. فبيولوجيا الجاراجات هى حقيقة واقعة. وتتزاحم الهند والصين والبرازيل وغيرها من الاقتصادات السريعة النمو فى سبيل الدفع قُدُمًا بالتكنولوجيات البيولوجية المحلية. وفى كل أرجاء العالم يسهم طلبة الجامعات والمدارس الثانوية فى البحوث والتطويرات الرفيعة المستوى. يا له من عالم نعيش فيه.

بل إننا نشهد بدايات التعاون الذى تحركه الهندسة المعقدة. وكما جاء فى الفصل الحادى عشر، شرعت حديثًا المؤسسات الكبرى التى تنشد تطوير تعديلات جينية متعددة السمات للنبات فى الدخول فى اتفاقيات تعاونية لا لسبب سوى أن الأمر بالغ التعقيد. والتحدى الذى يواجهنا هو تيسير ذلك التعاون بصورة أوسع، وبخاصة فى مواجهة مقاومة العديد من الشركات والمنظمات التى تتكسب فى الوقت الراهن من تضخيم سيطرة الملكية على الجينات المنفردة أو منتجات الجينات.

وفى سنة ٢٠٠٠ شاركت فى كتابة تقرير حكومى رسمى ينادى ببذل جهود فى سبيل نشأة هندسة بيولوجية محددة مفتوحة المصدر، وكان دافعى إلى ذلك شبح وسائل حماية الملكية، وكذلك الاحتمالات الكامنة للبيولوجيا المفتوحة المصدر فى تشجيع التشارك. وأُرسل التقرير إلى مكتب الأبحاث التابع لوزارة الدفاع الأمريكية مطالبًا بما يلى:

توفر الأموال لتطوير مجموعة من التكنولوجيات تكون متاحة بصورة علنية والمحافظة عليها، بهدف رعاية مجتمع من الباحثين الذين يسهمون فى هذا المستودع التكنولوجى المفتوح المصادر، ولكى ينشر الفكرة ويدعو لها وللعمل الفعلى فى البيولوجيا المفتوحة المصدر من خلال اللقاءات والشبكة العنكبوتية. وهدفنا على المدى القريب هو خلق مجموعة من المكونات التبادلية تكفى للوصول إلى حل وسط يكفل «نواة» أو قاعدة «مفتوحة المصدر» لأنظمة الفاج(*) والأنظمة الجرثومية والفيروسية والنباتية والحيوانية. وتشمل المكونات الأساسية المفتوحة المصدر عناصر جينات أنسجة تخصصية وتنظيمية، وبروتينات لتنظيم النسخ وتنظيم المواقع التى تتسم أنشطتها بقابليتها للضبط والتحويل بواسطة كيماويات ذات جزيئات صغيرة، وبإنزيم إعادة التجميع المتخصص فى مواقع معينة، ونطاقات من البروتينات يمكن استخدامها للتحكم فى تفاعلات محددة بين البروتينات.

وعلى شاكلة العديد من الأنظمة المنتشرة، سوف تكون جهود الأبحاث والهندسة البيولوجية التى تُجرى بأسلوب المصادر المفتوحة، سوف تكون قوية وتكيفية، وتوفر مزيدًا من الأمن والسلامة للاقتصاد والدولة[1].

ولم يتم تمويل الاقتراح، ولحسن الحظ أو لسوئه وضعت حكومة الولايات المتحدة قدرًا بالغ الضآلة من الاستثمارات يمكن أن تُفَسَّرَ باعتبارها تطويرًا لحرية الوصول المفتوح للتقنيات البيولوجية بل وحتى المحافظة على تلك الحرية.

(*) البكتريوفاج (أو الفاج اختصارًا) هى نوع من الفيروسات لها القدرة على إحداث العدوى فى الجراثيم وقتلها. والكلمة معناها أكل الجراثيم. وقد استخدمت منذ أكثر من ٩٠ سنة بديلاً للمضادات الحيوية فى الاتحاد السوفيتى وأوربا الشرقية وفرنسا. وهى حاليًا شائعة الاستخدام فى الأبحاث الخاصة بالقضاء على الجراثيم. (المترجم)

لبنات البناء البيولوجية بوصفها مصدرًا مفتوحًا

أنشأ درو إندى «مؤسسة لبنات البناء البيولوجية» (م ل ب ب) للأهداف التالية:

(*) **لتطوير وتنفيذ إستراتيجيات قانونية للتأكد من بقاء القطع المعيارية للبنات البناء البيولوجية متاحة للجمهور بكل حرية.**

(*) **لتشجيع تطوير أكواد الممارسة المعيارية التى تستخدمها القطع المعيارية للبنات البناء البيولوجية.**

(*) **لتطوير مواد تعليمية وعلمية كى يستغلها الجمهور العام فى استخدام لبنات البناء البيولوجية المعيارية الموجودة حاليًا وتحسينها، والإسهام بلبنات بناء بيولوجية معيارية جديدة[٢].**

ويشير تنامى المشاركة فى 'التنافس' فى مسابقات «أى جِم» وما نتج عنها من منجزات، يشير إلى أن (م ل ب ب) تسير على الدرب الصحيح فيما يتعلق بالمحافظة على حرية الوصول إلى المعلومات. غير أنه عند الشروع فى كتابة هذا الكتاب، أى فى بدايات ٢٠٠٩، لم يكن ثمة من إطارٍ يضمن أن لبنات البناء البيولوجية تبقى متاحة بحرية تامة إلا أن تضع تلك الأجزاء تحت النطاق العام[٣].

وتواجه (م ل ب ب) معضلة أن تخلق مشاعًا مبنيًا على آلاف القطع، التى سرعان ما تصبح عشرات الألوف من القطع. فالتقدم للحصول على حق استخدام كل تلك البراءات داخل منظومة للبراءات أو أية مؤسسة تعاقدية أخرى قد يكون أمرًا باهظ التكلفة بدرجة محبطة. ويضاف إلى ذلك أنه من أجل المحافظة على سلامة التراخيص، يتعين الدفاع ضد كل الدعاوى فى كل البراءات، مما يفتح الباب فى الحال لبحار من عمليات التقاضى التى سوف تُغرِقُ (م ل ب ب). وبهذا فسوف تضطر (م ل ب ب)، على الأقل بصفة مبدئية، إلى وضع كل قطع لبنات البناء البيولوجية تحت مظلة النطاق العام، وهى إستراتيجية يقول عنها راى وبويل إنها "لن تؤدى إلا أن تكون القطع غير

قابلة للحصول على براءة فحسب، وإنما سوف تقوض احتمالات الحصول على براءات على التحسينات المتواضعة"[٤]. وتكاليف جمع القطع بالنسبة لـ (م ل ب ب) تكاليف زهيدة فى الوقت الحالى بصفتها مؤسسة - فالعمالة والبنية التحتية تتولاهما الجامعات وغيرها من المؤسسات التى لا تبتغى الربح. وبذلك فإن تكلفة حماية الحقوق الفكرية تتجاوز بكثير تكاليف الاختراع، وتواجه (م ل ب ب) نفس النوع من المشاكل التى أحاول أنا، بوصفى من المستثمرين، أن أجتازها وأنا أبتكر على نطاق ضيق، قطعة واحدة فقطعة (انظر الفصل الثانى عشر).

يمكن أن نصف القصد الفلسفى لمؤسسة البناء البيولوجية بأنه النظرة إلى الدنا بوصفه قريب التماثل مع أكواد الحاسب الآلى. والإشارات الصريحة إلى «برمجة الدنا» تشير أن المهندسين المختصين يرون فى تصميم دارات وقطع جديدة شيئًا شديد الشبه بمشاكل البرمجيات (انظر الفصلين السابع والثامن). وكما جاء فى الفصل السابق، فإن أبسط وسائل ضمان حقوق الملكية على البرمجيات وأقلها تكلفةً هى حق الملكية الفكرية، الذى يمكن عندئذ ترخيصه عن طريق قانون العقود. وثمة عوار واضح فى التشابه بين البرمجيات المفتوحة المصدر والبيولوجيا المفتوحة المصدر فى هذه النقطة بالذات.

فلا وجود لأساس قانونى لتطبيق حقوق النشر فى البُنى البيولوجية. وتشير الملاحظة التى أبداها ستيف وِبر بأن "خطط الترخيص هى البنية الاجتماعية الرسمية التى تتناول المصادر المفتوحة"، تشير هذه الملاحظة إلى أن البنية الاجتماعية المحيطة بالبيولوجيا تتحدد إما بتبادل المعلومات من خلال المجالات العامة أو بالبراءات[٥]. وفى الحق، نجد أن المؤسسات المهتمة بالبيولوجيا الأساسية أو بتطوير التطبيقات إما أنها مؤسسات لا تبغى الربح بكل وضوح (وغالبيتها معاهد أكاديمية مموَّلة بهبات ومنح) أو مؤسسات تبتغى الربح بكل وضوح (غالبيتها مؤسسات ضخمة تمولها المبيعات). وهذا تقييد جوهرى على حرية العلماء والمهندسين فى أن يقرروا بأنفسهم كيف يشاركون فى السوق. والمصادر المفتوحة هى طريق ثالث

لمطورى البرمجيات فى المشاركة، ولكن هذا الخيار ليس متاحًا لأولئك الذين يبتكرون فى البيولوجيا.

ونظام البراءات أبعد ما يكون عن أن يكون آلية مثالية تعمل كحافز إما لتطوير التكنولوجيا البيولوجية أو كقواعد مُنَظِّمة للتركيبات الاجتماعية. ويحتاج الأمر إلى اختراع نوع آخر من 'الحقوق الحصرية'، ربما على صورة اختراق اجتماعى اقتصادى آخر يفتح مجالاً لنوع آخر من المشاع، يستطيع المبتكرون استخدامه لاختيار الشروط التى يسهمون بمقتضاها فى الأسواق.

تعريف آخر للبيولوجيا المفتوحة المصدر

ريتشارد جفرسون هو رجل له رسالة. وقد اشتهر جفرسون بأنه مخترعٌ للعديد من التكنولوجيات التى تسهل من التعديلات الجينية فى النباتات. كما اشتهر أيضًا بقراره بأنه بدلاً من أن يتقاضى ما يعتبره أتعابًا باهظة كالتى تتقاضاها العديد من شركات البيوتك، فإن أفضل وسيلة لنشر ابتكاراته بين أيدى أولئك الذين يريدون استخدامها هى أن يدع المستخدمين يدفعون ما يطيقون. وقد دفعت «مونسانتو»، وهى شركة متعددة الجنسيات، دفعت «مبلغًا كبيرًا»، بينما دفعت شركة أصغر بكثير ما يكفى جفرسون لشراء جيتار كهربائى[٦]. أما الباحثون فى المنظمات التى لا تبغى الربح أو الأكاديمية فيحصلون على المعلومات مجانًا، بينما تسهم الشركات ذات الربح المتواضع فى الدول النامية إسهامات عينية فى العمالة أو فى أية نواحٍ أخرى[٧].

وبفضل الأتعاب التى حصل عليها، تمكن جفرسون من تأسيس مؤسسته الخاصة للأبحاث، وهى مؤسسة «كامبيا» (CAMBIA) فى أستراليا، وأن يختبر الإصدار الذى ابتدعه للمصادر المفتوحة. ويتمركز العمل حول البراءات. وجفرسون واضح تمام الوضوح فى أنه يحاول أن يغير نظامًا يرى فيه أن البراءات فى التكنولوجيا البيولوجية

هى أدوات تستخدمها الشركات الكبيرة أحيانًا لخلق عوائق أمام المنافسة: "عندما تخترع الشركات الكبيرة تلك التكنولوجيات أو تكتشفها أو تتحصل عليها، فهى نادرًا ما تستخدم البراءات لخلق الجيل التالى من التكنولوجيا وتشارك فيه"(٨).

وتبدأ خطوات جفرسون المبدئية باتفاق ترخيصى للتكنولوجيا البيولوجية. وتشترط التراخيص التقليدية للبيولوجيا المفتوحة المصدر على أنك لا تفرض حقوق ملكيتك، بما فيها البراءات، بأية وسيلة ضد أطراف أخرى توافق على نفس الترخيص، فى مقابل أن تتمتع بالحقوق المجانية المعفاة من أتعاب حقوق المخترع فى استخدام تقنية ما(٩). ونلاحظ أن المنحة «المعفاة من أتعاب حقوق المخترع» لا تستبعد دفع أتعاب (اكتتاب دعم التكنولوجيا) مقابل السماح باستخدام التقنية، وهى أتعاب تتيح لكامبيا أن تدفع فواتيرها. ويتراوح جدول الأتعاب الموجود على الترخيص بين صفر و١٥٠,٠٠٠ دولار، ويتوقف على حجم المؤسسة التى توقع على الترخيص.

وثمة سمة مهمة أخرى لإستراتيجية الترخيص هى تضمنها لمنحة إلزامية تُدفع لكامبيا. وبمجرد أن تقدم طلبًا للترخيص، إن أنت أدخلت تحسينات على التكنولوجيا، فلا بد أن تعيد الترخيص بالتحسينات إلى كامبيا. وبذلك ينمو وعاء التكنولوجيا.

إن تراخيص البيولوجيا المفتوحة المصدر مجهزة بكل وضوح لأن توفر تسويقًا غير حصرى، وهو الشىء الذى يخلق وعاءً متساهلاً للبراءات تديره كامبيا(١٠). فإذا أنت وافقت على استخدام ترخيص تحت مظلة ترخيص لبيولوجيا مفتوحة المصدر، ثم أجريت بعض التحسينات، فلا بد لك لا من السماح للغير بالدخول على تلك التحسينات فحسب وإنما أيضًا عليك أن تضمن للأعضاء الآخرين فى الوعاء أن يكون لهم حق الدخول الحصرى؛ فالهدف من استخدام تراخيص البيولوجيا مفتوحة المصدر هو "تطوير مشاع محمى فى التكنولوجيا".

وبعد أن تُحْدِثَ تحسينات عن طريق ترخيص لبيولوجيا مفتوحة المصدر، ومن المفترض أن ذلك سوف يكلفك قدرًا من المال، فإنك بوصفك من حاملى الترخيص يبدو أن أمامك اختياران. ففى استطاعتك أن تتنازل عن التحسينات (التى أجريتها)، وتضعها فى الوعاء العام وبذلك تتنازل عن أية حقوق، *بما فى ذلك الحق فى جعل أية تحسينات أخرى تجريها مقتصرة على الوعاء*. والبديل الثانى هو أن تستطيع أن تحاول المحافظة على حقوقك بأى صورة من الصور، ولكنك، وفقًا لشروط الترخيص، يتوجب عليك أن تجعل التحسينات متاحة لكل الحاملين الآخرين لترخيص البيولوجيا مفتوحة المصدر. وفى الوقت الراهن، نجد أن البراءة هى الوسيلة القانونية الوحيدة للمحافظة على مثل تلك الحقوق. ويشمل ذلك ضمنيًا أنك لابد أن تحصل على حماية البراءة لأى تحسينات تجريها لكى تضمن الحقوق التى يمكن عندئذ أن تكون متاحة للأعضاء الآخرين فى الوعاء. وفى هذه الحالة، فإن «الكود المصدرى» بعد أن فُتِحَ ، وهو الذى يشكل «الملكية» فى المشاع، ليس بيولوجيا فى حقيقة الأمر، ولكنها المحتوى المذكور فى البراءة. وتتكون «أنظمة التشغيل» فى تراخيص البيولوجيا المفتوحة المصدر من مجموعات معقدة من قوانين البراءة وتطوير المُنْتَجِ والتسويق؛ وبمعنى آخر، تقترب أنظمة التشغيل من النظام القانونى والاقتصاد الأكبر منها.

ولكى أكون واضحًا، لا يحدد هذا النمط من الترخيص مكانًا عامًا مفتوحًا وإنما حديقة ذات أسوار برعاية كامبيا، والدخول إليها لا يتم سوى بشراء مفتاح. وحتى لو دفعت مؤسسة ما أتعابًا بالغة الضآلة مقابل الدخول المبدئى إلى الوعاء، فإن إعادة وضع التحسينات فى الوعاء يتطلب السعى للحصول على حماية البراءة. ولقد بُنِيَتْ البيولوجيا مفتوحة المصدر للعمل فى إطار تحت مظلة القوانين الحالية لحماية الملكية الفكرية. غير أنها ليست حديقة يستطيع أى شخص أن يلعب فيها. وحتى مع التأكد من أنك تدرك أن الحصول على ترخيص للبيولوجيا مفتوحة المصدر يتطلب توكيل محامٍ. ويضاف إلى ذلك أنه لما كانت المحافظة على المشاع فى حد ذاتها تعنى تكاليف، مثل تكاليف نقل المواد ودفع رسوم البنية التحتية لتكنولوجيا المعلومات، فإن كامبيا

تطلب "من طالبى الترخيص الذين يبتغون التربح أن يدفعوا بعضًا من تلك التكاليف، بمعدلات تتناسب مع حجم الاستثمار"[١١]. وبواسطة الجدول المتغير للأتعاب، يسعى جفرسون إلى أن يضع شروطًا للمشاركة مصممة وفق حالة المؤسسة طالبة الترخيص؛ فالشركات الكبيرة تدفع أكثر من الشركات الناشئة ومن الأكاديميين. غير أن الأتعاب هى من حق كامبيا لا الملاك والمطورين الأصليين للتكنولوجيا. وعليهم أن يتنافسوا ويبقوا على قيد الحياة من خلال المشاركة فى السوق؛ وعليهم أن يشجعوا على نشأة الزبائن الدافعة. وعلى الرغم من أن البيولوجيا مفتوحة المصدر تشكل تجربة ممتازة، فإنه ليس من الواضح حتى الآن ما إذا كان «المشاع المحمى» الذى يجسد خصائص البيولوجيا المفتوحة المصدر سوف يحث حقًا على انتشار الابتكار، لأنه ليس واضحًا كيف تتمكن الكيانات الصغيرة من استخدام المشاع لتحقيق أرباح.

وكما ذكرنا فى الفصل السابق، يمكن للبرمجيات أن تصبح «مجانية وحرة» بالمعنيين اللذين تعنيهما الكلمة - الحرية الاقتصادية والحرية الشخصية - لأن تكلفة نسخها ضئيلة للغاية. وفى الإمكان حماية استخدام البرمجيات وتوزيعها عن طريق استخدام حقوق ملكية وعقود زهيدة الثمن، ولا يحتاج انتشار البرمجيات واتفاقيات ترخيصها إلا إلى رأسمال بالغ الضآلة. وفى المقابل، نجد أنه بسبب أن الابتكارات البيولوجية تحتاج حاليًا إلى حماية البراءات، فإنه حتى المشاع البيولوجى «المفتوح المصدر» الذى ينفذ وفقًا لقانون العقود يحتاج إلى إنفاق رأسمال كبير لحماية كل تكنولوجيا فى هذا المشاع.

إن هدف جفرسون جدير بالثناء؛ والتعجيل بالابتكار هو من السمات الرئيسية لهذا الكتاب، ولعل جفرسون يملك آلية جيدة للمساعدة فى ذلك. غير أنه لسوء الحظ، تقف الأرضية الحالية للبراءات، وكذلك الشركات الكبيرة، حجر عثرة أمام التقدم، مُشَكِّلَةً موانع تبطئ كل شىء حتى تلك الشركات ذاتها. والتكاليف فى البيوتك تنهار بمعدلات أُسية، والتعقيدات تُبنى الآن من الصفر؛ وكلا الأمرين يتيح أنماطًا من

الابتكار شديدة الاختلاف عما كان موجوداً من قبل. وثمة قلق مستقبلى حقيقى هو أن براءات عديدة معقدة وواسعة النطاق قد تم التقدم للحصول عليها وتم منحها ليس فقط لمنتجات بيولوجية وإنما أيضًا فى تكنولوجيات أساسية تتعامل، كما يقرر لورنس لسيج، مع غابة البراءات الناتجة وحواجز التكاليف المصاحبة لها "وسوف تثرى القديم فى مواجهة الجديد"(١٢).

وإذا ما نظرنا قُدُمًا، فعلينا أن نتعامل مع مسألة ما إذا كانت ثمة تغيرات جوهرية مطلوبة فى قوانين الملكية الفكرية من أجل المحافظة على القدرة على الابتكار. وإذا ما أخذنا فى اعتبارنا كم الاستثمار الموجود فى البراءات الحالية، فهل هناك من وسيلة لتوسيع نطاق حقوق الإنتاج والاستخدام أبعد من البراءات لكى نيسر مشاركة أوسع؟ وثمة أسلوب للتعامل هو أن نبحث بصورة أوسع الوسائل التى كان يتم بمقتضاها تبادل المعلومات والسلع على مر التاريخ الإنسانى.

هل ننشئ بازارًا بيولوجيا ؟

كان كتاب «الكاتدرائية والبازار»(١٣). (The Cathedral and the Bazaar) الذى ألفه إريك ريموند من بين أوائل المحاولات لشرح ظاهرة المصادر المفتوحة. ويقارن الكتاب بين السيطرة المركزية على مشاريع التطوير (الكاتدرائية) بالنموذج الاختيارى المنتشر الذى تمثله المشاريع المفتوحة المصدر (البازار). وكان دور الاختيار الشخصى واضحًا وجليًا فى أقوال ريموند فى التعاملات بين زعماء المشاريع المفتوحة المصدر والمطورين، وهى تعاملات تبدو فى رأى ريموند مثل ظاهرة السوق التلقائية التى يمكن ملاحظتها فى البازار. ومنذ نشر الكتاب ظل الجدل سائدًا إلى ما لا نهاية حول فائدة التشبيه ومدى دقته، ولكن التمييز بين المنظمات وفقًا لمركزية السيطرة وظاهرة عفوية السوق تفيد كنقطة انطلاق للتفكير فى تعريف آخر للمصادر المفتوحة وتطبيقاتها فى التكنولوجيا البيولوجية.

وتتبنى جانيت هوب وجهة النظر القائلة بأن مثال البازار يحمل بين ثناياه آمالاً عريضة فى تيسير الابتكار فى التكنولوجيا البيولوجية. وكتابها «البازار البيولوجي، ثورة المصادر المفتوحة والتكنولوجيا البيولوجية» (Biobazar, The Open Source Revolution and Biotechnology) – هو أول تحليل دقيق للقضايا الاجتماعية والقانونية والاقتصادية التى يتوجب على المرء تدارسها عند تصور صورة مستقبلية للبيولوجيا مفتوحة المصدر[١٤].

وعلى غرار ريتشارد جفرسون، تعرب هوب عن قلقها من أن نظام البراءات "مجهز أحسن تجهيز لتقديم أكبر قدر من الابتكارات ذات القيمة الاجتماعية فى التكنولوجيا البيولوجية"، وبخاصة فى مجالات الأدوية والمحاصيل[١٥]. وهدفها الأسمى هو أن تتناول الظروف التى قد تجد فيها الشركات التى تبغى التربح أن نموذج المصادر المفتوحة يمكن أن يكون مفيداً اقتصادياً "دون اللجوء إلى الحصول على تعويض مباشر على صورة أتعاب للترخيص أو أية وسائل مالية أخرى"[١٦].

وتتدارس هوب عديداً من جهود المصادر المفتوحة فى التكنولوجيا البيولوجية الجارية فى الوقت الراهن، وتخلص إلى استنتاج أن "المصادر المفتوحة ... ليست فى المقام الأول وسيلة للتعامل مع مأسى معاداة المشاع. وإنما ... هى وسيلة لاستباق تلك المآسى بتأسيس مشاع قوى يختص بالتكنولوجيات الأساسية أو الجوهرية والتى يحتمل أن تتزايد قيمتها بتراكم الابتكار"[١٧].

وتنمو هذه الصورة من البيولوجيا المفتوحة المصدر بطريقة عضوية جنباً إلى جنب مع المنظمات الموجودة، ويتيسر نموها بانخفاض التكاليف وتكاثر المهارات والمعلومات. وتُستخدَمُ هذه العوامل فى تبرير تبنى المؤسسات الكبيرة لإستراتيجية المصادر المفتوحة – الجامعات والمعامل التى لا تبغى الربح والشركات – بهدف تسهيل تدفق المعلومات والاستفادة من القدرات الفائضة والعمالة التى تفيض عن الحاجة من أجل الصالح العام.

وتلاحظ هوب أن "السؤال الواضح للشركات التى تبغى التربح (مثل شركة أدوية) هو لماذا أتخلى عن جواهر التاج؟ وهى تعدد طرقًا متعددة تستطيع بها المؤسسات أن تستخلص أرباحًا من الملكية الفكرية بـ «الكشف الحر» الذى يشمل (١) وضع معيار للصناعة، ربما يفضى إلى نمو المبيعات ويدعم منتجات أخرى، (٢) الاستفادة من تحسينات التكنولوجيا التى يصنعها آخرون (وهو أحد دوافع المشاركة فى بيولوجيا المصادر المفتوحة)، والتى قد تؤدى إلى وفورات فى التكاليف، (٣) تعزيز السمعة وقيمة المنتجات[١٨].

وتجادل هوب قائلة: "حتى لو قررت شركة صغيرة أن تتبنى المصادر المفتوحة كإستراتيجية لتخفيض التكلفة أو للتفوق على المنافسين، فإن أفعال هؤلاء المتبنين ربما يكون لها تأثير كبير":

> **بإضعاف استعداد الزبائن لدفع رسوم للحصول على حق استخدام أدوات من مصدر مملوك بينما يستطيعون الحصول عليه بتكلفة أقل من مصدر مفتوح، فإن بمقدور عدد صغير من متبنى المصادر المفتوحة تحريك توازن المنافسة فى أحد القطاعات بعيداً عن التكنولوجيات المملوكة. وبهذا المعنى فإن بمستطاع قواعد المصادر المفتوحة أن يكون لها من القوة بحيث تحدث تغييراً فى الصناعات. ولهذا السبب نجد ميكروسوفت تتوجس من لينوكس، وهو السبب أيضًا فى أن المصادر المفتوحة لها احتمالات أن تكسر مأزق الملكية الفكرية فى التكنولوجيا البيولوجية[١٩].**

لاحظت هوب أيضًا أن بنية للمصادر المفتوحة لا تنشأ بالضرورة من الخيال. ففى حين وضع ريتشارد ستولمان إطاراً للرخصة الأصلية للمصادر المفتوحة، وكتب جانبًا كبيراً من الأكواد التى توجد اليوم فى لينوكس، إلا أن إسهاماته الأصلية لم تتحول إلى تكامل عملى إلا من خلال جهود الآخرين. فكانت جهود ستولمان نقطة البداية للينوس تورفالدز، الذى صنع بقية نواة لينوكس[٢٠]. وفى هذه الحالة، أُضيفت إسهامات العديد من المشاركين (بأحجام متفاوتة) إلى شىء أكبر بكثير من مجموع القطع: "قد تكون

للتخفيضات الإضافية فى تكاليف الأعمال التجارية المتعلقة بالملكية الفكرية تأثيرات غير متناسبة على الظروف المضادة للمشاع؛ وهناك نقطة لا عودة، بعدها تكون الأرباح الناتجة عن تطوير بديل من المصادر المفتوحة لأى عنصر من عناصر صندوق أدوات العمل أعلى من أن يجعل العمل نقطة جذب لجهود من جانب أولئك الذين يودون رؤية مجموعة كاملة من الأدوات"[٢١]. وبذلك، ومع استمرار انخفاض التكاليف وانتشار المساهمة فى التقنيات البيولوجية البازغة فى كل أرجاء العالم، فلربما نشهد مكونات صندوق أدوات للبيوتك - «توزيع» لمصادر مفتوحة للبيوتك - تسهم قطعة فقطعة من كل أنحاء العالم. وفى الحق، قد تكون تلك هى الوسيلة الوحيدة لتجميع مثل ذلك الصندوق، بالنظر إلى أن الناس يوالون إنتاج أدوات ومكونات مملوكة ووسائل لا تشكل فى حد ذاتها تحديًا حقيقيًا للملكية الفكرية الراهنة.

وتسارع هوب بإبداء ملاحظة فى كتابات أخرى لها أن التشابه بين البرمجيات والبيولوجيا يتوقف عند هذه النقطة، وأن المصادر المفتوحة ليس مقصوداً منها أن تحل محل نماذج العمل الموجودة حاليًا:

> يخلط الناس أحيانًا بين نجاحات وإخفاقات البرمجيات المفتوحة المصدر وإمكانية بيولوجيا مفتوحة المصدر ... وليس من الضرورى أن ننظر إلى المصادر المفتوحة بوصفها نموذجًا لعمل تجارى قائم بذاته. وعوضًا عن ذلك، يتعين النظر إليها كإستراتيجية عمل يمكن استخدامها كمتممة لإستراتيجيات أخرى.
>
> وفى نهاية المطاف، نجد أن البرهان على حيوية التكنولوجيات البيولوجية المفتوحة المصدر لا يرتبط بالنجاح النهائى للبرمجيات المفتوحة المصدر. وببساطة، تشكل البرمجيات المفتوحة المصادر القاعدة لأى تشابه وهى بذرة الفكرة وليست صيغة جامدة للنجاح[٢٢].

وكون التكنولوجيا البيولوجية المفتوحة المصدر قد أوحى بها تشابهٌ مع البرمجيات هى موضوع يستحق دراسة أكثر استفاضة.

ما المقصود بالضبط بمصطلح «مصدر» ؟

إن قصة البرمجيات المفتوحة المصدر لهى قصة مثيرة. فهى تملك دورًا كبيرًا ومتناميًا بكل وضوح فى الاقتصاد. ففكرة أن بمقدور مطورى البرمجيات أن يتنازلوا عن ثمار جهدهم ورغم ذلك يستطيعون بطريقة ما أن يشاركوا فى سوق فاعل هى فكرة مدهشة وثورية. كما أنها أيضًا فكرة تسبب تشتتًا كبيرًا.

وفى حين أنه من اليسير أن نجد تعريفًا لـ «المصادر المفتوحة» فى إطار مجال البرمجيات، إلا أننا لا نجد إلا أمثلة جد قليلة لتعريفات محكمة فى مجال التكنولوجيا البيولوجية. وإذا ما تابعنا السعى وراء التشبيه وقلنا أن الدنا هو كود مصدرى، فإن توزيع الدنا أو وصفه باستخدام إستراتيجية التراخيص المفتوحة المصدر تكون مرادفة لبناء مشاع من البرمجيات. وتحتاج هذه الخطوة إلى الحق فى استبعاد المستخدمين الآخرين للدنا، بينما لا تقر قوانين الولايات المتحدة حاليًا إلا الحصول على الحق من خلال براءة اختراع. والقانون لا يعامل تجمعًا للأحرف مكونًا سَلَسَلَةً للدنا لا بوصفها من الأكواد ولا كعمل أدبى. وكما لاحظنا آنفًا، نجد أن البراءات مكلفة، ومن الجلى أن حماية مشاع يتكون من آلاف الجينات التى تمت هندستها هو أمر باهظ بدرجة محبطة. وبدون القدرة على نشر التراخيص المنخفضة التكاليف، فإن على البيولوجيا المفتوحة المصدر أن تعتمد على شىء آخر كـ «مصدر».

يكمن أكبر إخفاقٍ للتشابه فى أنه مجرد قصة موحية ومثيرة للعواطف. وكما ذكرت فى بداية هذا الفصل، فإن الكود المصدرى الذى يشكل المشاع تحت مظلة التراخيص البيولوجية المفتوحة المصدر هو فى حقيقة الأمر ملكية فكرية تحددها البراءات. ولما كانت التراخيص البيولوجية المفتوحة المصدر بنية تعاقدية مبنية على تلك البراءات، فإن كل التساؤلات والتعليلات يتم التعبير عنها بوضوح، وهو ما يجعلها تؤدى عملها، ولعلها تثبط الاستخدام الواسع. والبيولوجيا المفتوحة المصدر أمر بالغ التماسك وهى تشكل بنية تعاقدية يمكن الدفاع عنها من الناحية القانونية، ولكنها

تتحمل نفقات هائلة للمحافظة عليها والمشاركة فيها بوصفها امتداداً للنظم القائمة لحقوق الملكية. وعلى الرغم من ذلك، توجد البيولوجيا المفتوحة المصدر اليوم وتعمل فى إطار قانونى قائم. وإلا تبقى البيولوجيا المفتوحة المصدر أو التكنولوجيا البيولوجية، كما أُعرِّفُها أنا ودرو إندى وجانيت هوب أو أى شخص آخر، تبقى مجرد تشابه - أو حكاية - لأنها بأى حال من الأحوال لا تشكل نموذجًا اقتصاديًا قابلاً للعمل أو للاختبار.

ولهذا سأكون أول من يعترف أنه بالرغم من أن تعبيرات «البيولوجيا المفتوحة المصدر» و«التكنولوجيا البيولوجية المفتوحة المصدر» هى عبارات جذابة، فإن محتواها محدود فى الآونة الراهنة. ومع نشأة المؤسسات التى لا تبغى التربح وتبدأ فى العمل (مثل البيولوجيا المفتوحة المصدر ومؤسسة لبنات البناء البيولوجية، بافتراض التوافق على نوع من الترخيص للأخيرة)، فإن بعض المتغيرات سوف تتحدد تعريفاتها، وعلى أقل تقدير سوف يكون لدينا بنية ما نستطيع التحدث عنها واختبارها فى العالم الحقيقى. وعندما توجد تراخيص حقيقية لقطع لبنات البناء البيولوجية، وعندما يتم اختبارها فى ساحة القضاء، فسوف يكون لدينا شىء من الإدراك حول كيفية عملها.

لماذا ننزعج من المصادر المفتوحة ؟

ثمة أسباب مهمة تجعلنا نحاول توسيع نطاق المشاركة فى كلٍّ من العلوم الأساسية وتطوير التكنولوجيا. ونجد أن حركة البرمجيات المفتوحة المصدر، كما يقول ستيف وبر، "هى فى المقام الأول تجربة فى الاقتصاد السياسى"، ويتوجب علينا أن نؤكد على كلمة اقتصاد، لأنه بدون تأثيرات اقتصادية، سواء يتم قياسها بالدولارات أو بالإنتاجية أو بأى مقياس آخر، لكانت البرمجيات المفتوحة المصادر مجرد مجموعة من الأكواد خلقها مطورو البرامج ويتبادلونها فى أوقات فراغهم. ومهما حصد مطورو

البرمجيات أنفسهم من فوائد اقتصادية من المصادر المفتوحة - سواء بالسمعة أو بتعويض مادى أو للتسلية - فإن الاقتصاد ككلٍّ يعتمد اعتمادًا متزايدًا على ذلك الكود. وتعتمد شركة جوجل، التى حققت عائدات أربت على ١٦ بليون دولار فى سنة ٢٠٠٧، على البرمجيات المفتوحة المصدر بصورة كبيرة[٢٣].

غير أن البرمجيات المفتوحة المصدر لا تقتصر تأثيراتها على النطاق الواسع. فلقد كان للتوسع فى حق الولوج إلى الأكواد تأثيرات اقتصادية هائلة على الأفراد والشركات الصغيرة. والحاسبات المكتبية (desktop) والمحمولة (laptop) المنخفضة التكلفة التى تعمل بنظام لينوكس تبيع الآن مبيعات واسعة فى سوق المستهلك، وحصتها السوقية (market share) تضاعفت إلى ما يقرب من ٢ بالمائة فى سنة ٢٠٠٨ وحدها[٢٤]. وبتخفيضها لتكاليف شراء وتشغيل الحاسب، وسَّعَت المصادر المفتوحة من نطاق القدرة على إنتاج محتوياتٍ للإنترنت واستهلاكها، مع المنتجات المصاحبة للاتصالات والتعليم. كما وسَّعَت البرمجيات المفتوحة المصادر أيضًا من قدرة الأفراد على كتابة أية أكواد يودونها - ولأى غرض من الأغراض - على الأجهزة التى تعمل بنظام لينوكس. ولقد باتت المصادر المفتوحة أدوات مصيرية لصغار المبتكرين.

فهل تستطيع المصادر المفتوحة بالمثل أن تيسر من تطوير التكنولوجيات البيولوجية؟ وهل يحتوى السوق، كما هو قائم اليوم، على آليات تشجع على الابتكار البيولوجى؟ وربما تكون الأسواق محتاجة إلى تعديل لكى تتعامل بطريقة صحيحة مع الابتكارات فى التكنولوجيا البيولوجية. وقد يكون البديل هو أن فكرة السوق ذاتها تحتاج إلى إعادة التفكير، أو أن الأمر يتطلب بنية من نوع ما من خارج السوق.

والأمر الأشد إلحاحًا هو هل فى الإمكان استخدام مبادئ المصادر المفتوحة للسماح بابتكارات بيولوجية سريعة، وفى نفس الوقت تخفيض النفقات، *داخل السوق الحالى*؟ ولعل نجاح السوق أو فشله فى تقديم ابتكارات سريعة سوف يحدد قدرتنا على مواجهة الأخطار التى تتهدد الأمن والسلامة الجسدية والاقتصادية. والسوق

الموجود حاليًا هو البيئة التى نسكن فيها، وهو البيئة التى تشكل إطار الاستثمار والتطور والتصنيع فى المستقبل المنظور.

غير أن تلك البيئة ليست ساكنة، والتكنولوجيا تغير بإصرار من قدرة المبتكرين على المشاركة فى السوق. ويظهر المبتكرون على كل المستويات الآن، ونحتاج إلى أن نسهل عليهم عملهم ونبنى وسيلة للتأكيد على أن جهودهم لن تتمخض عن أخطار غير مقصودة أو لا يمكن التعرف عليها. وتنعقد آمال عريضة على تطوير تشابهات بيولوجية لمشاع يتكون من أكواد مفيدة، ونظام تشغيل يقوم بتشغيلها. غير أن التنفيذ العملى لا يبدو قريب المنال.

البيولوجيا المفتوحة

عند هذه النقطة لم أعد أعرف ما الذى يمكن أن تكون عليه «البيولوجيا مفتوحة المصادر» عند الممارسة العملية. فالبيولوجيا ليست برمجيات، والدنا ليس - بعدُ - من الأكواد. وكان من بين أهداف تصدينا لكتابة هذا الكتاب أن أفتتح المناقشات وأدعو أكبر عدد ممكن من الناس للتفكير إلى أين يأخذنا المستقبل وكيف ننظم أنفسنا بغرض الاستفادة القصوى.

وسوف أظل، مثلما كنت عام ٢٠٠٠، مهتمًا أشد الاهتمام بالحفاظ على مقدرتنا على الابتكار وتعزيزها. وأدرك، على وجه الخصوص، أن الابتكار الآمن يتحقق أفضل ما يكون من خلال انتشار البحوث والتصنيع البيولوجى. والأكثر عموميةً من المصادر المفتوحة هو أن علينا أن نسعى ونجاهد فى سبيل تعزيز «البيولوجيا المفتوحة» والحفاظ عليها. وأعنى بمصطلح «البيولوجيا المفتوحة» التحصل على حق التوصل إلى الأدوات والمهارات اللازمة للمشاركة فى الابتكار والاقتصاد المنتشر. وكلما زادت أعداد الأشخاص الذين يستوعبون قدرات التكنولوجيات البيولوجية وقيودها فى لحظة بعينها من الزمن، كلما تزايدت قدراتنا على الابتكار وتجنب الأخطاء، وكلما كانت المناقشات

عن الأخطار مجدية، كلما ترسخ إدراكنا للفوائد المادية والاقتصادية للتكنولوجيا الناضجة. وعلى النقيض من ذلك، كلما ازدادت الأهمية الاقتصادية للتكنولوجيات البيولوجية كلما استُحِث مزيد من الناس لفهم كيفية عمل التكنولوجيا، وتزايدت أعداد من يشاركون فى التطويرات التجارية.

يعتمد التسويق الناجح للتقنيات البيولوجية اعتماداً كبيراً على العائد المتوقع من الاستثمار، والذى بدوره قد يعتمد على أنظمة الملكية الفكرية. وهو قول صحيح فيما يختص بكبار المشاركين وصغارهم على حد سواء، وربما كان صحيحاً بصرف النظر عن النفقات المالية للمشاركة فى السوق. وحتى لو كانت النفقات توالى الانخفاض، وبالتالى تتيح للشركات الصغيرة أن تبتكر حسبما يتراءى لها، فإن محاولات تسويق الابتكارات الناتجة ستكون بالغة الصعوبة بدون المقدرة على ضمان نوع من الحقوق الحصرية. فبدون الحقوق الحصرية تكون الابتكارات تحت رحمة المنافسة من قبل أى مغامر، وهو شخص تقول عنه جانيت هوب إنه "يقلد الاختراع ومن ثم يحصل على الفوائد كاملةً دون أن يقوم باستثمارات ذات شأن من وقته وجهده ومهاراته أو نقوده"[٢٥].

والتكنولوجيات البيولوجية واسعة الانتشار بالفعل بحيث يمكن بسهولة نسخ غالبية المنتجات فى أى بلد من البلدان. والخسارة العالمية من جراء ذلك النسخ خسارة هائلة؛ وتبلغ نسبة السلع المزورة ما يقارب ٨ بالمائة من حجم التجارة العالمية[٢٦]. فتصل بذلك إلى ٥١٢ بليون دولار كمبيعات ضائعة، ويقع عبء حوالى نصف ذلك التأثير على شركات أمريكية[٢٧]. ولهذا، وكما تذكر هوب، فإن الكشف المجانى عن المعلومات لا يبدو مفيداً للشركات الصغيرة للتكنولوجيا البيولوجية: "إن حقيقة أن ترخيصاً مفتوح المصدر لا بد وأن يضمن حرية حامل الترخيص فى تقليد التكنولوجيا المرخصة ويوزعها على آخرين، تعنى أن الثمن يميل إلى الانخفاض تجاه تكلفة هامشية للإنتاج والتوزيع "[٢٨].

وإذًا، لو أن مبتكرًا قام بتوزيع مُنْتَجٍ من خلال ترخيص مفتوح المصدر - يتيح مثلاً الحصول على حق استخدام بروتين تمت هندسته - فإن القدرة على إعادة إنتاج البروتين وتوزيعه من الأفضل أن يُنَصَّ عليها صراحة فى الترخيص. وبذلك فإن أى هامش ربح على مبيعات أى بروتين يمكن استخدامه فى أبحاث وتطويرات أخرى سوف يستولى عليه فى الحال مغامرون أحرار، والعديد منهم قد يكونون يعملون فى اقتصاديات تنافس المبتكر الأصلى فى المبيعات. وكون هذه البيئة التنافسية موجودة حقًا يؤكد أن القيمة فى العديد من ابتكارات التكنولوجيا البيولوجية تكمن فى تصميم الشىء وليس فى مجرد صناعته. وقد تكون الوسيلة الوحيدة للنجاح التجارى هى استمرار حرمان المنافسين من حق بيع المصنوعات المبنية على ذلك التصميم.

ولا أعنى بذلك التوقف عن ممارسة البيولوجيا المفتوحة المصدر، أو تفحص التراخيص ذات الصلة، ولكن مجرد أنى لا أستوعب كيف تسهم فى مساعدة الابتكار فى الوقت الراهن.

جانب كبير من الابتكارات التى يحتاجها مجتمعنا واقتصادنا لا يأتى من الأوساط الأكاديمية، ولا من الشركات القائمة حاليًا وإنما من أشخاص يرتجلون فى جاراجاتهم أو فى شركات جديدة لم تنشأ بعدُ. وهؤلاء هم المستخدمون المهمون للبنات البناء البيولوجية على المدى البعيد؛ وهم الأشخاص الذين يحتاجون إلى حق التوصل إلى تركيبات ترخيصية لا تحتاج إلى براءات لكى يسوقوا المزيد من الابتكارات؛ وهم الأشخاص الذين يرومون القدرة على بناء أنظمة بيولوجية دون الحاجة إلى منح حكومية كبيرة. ومع انخفاض التكلفة، سوف يتبع الناس اهتماماتهم ويشاركون فيما يستطيعون المشاركة فيه.

وبغض النظر عن الكيفية التى يُبنَى بها الترخيص وما إذا كان من الممكن اعتبار مشروع ما «مصدرًا مفتوحًا» من الناحية الرسمية، فإن التحدى الأكبر فى إبقاء البيولوجيا مفتوحة هو الحفاظ على المقدرة على اختيار ما تريد العمل عليه، وكَمّ الجهد

المطلوب بذله. ويضاف إلى ذلك، من منظور كيفية إدارة المشروع، أنه من المهم أن ندرك أن الخبرات والمهارات لا تتوزع مطلقًا بطريقة موحدة بين المشاركين فى أى مشروع. وأحيانًا تختلف المهارات والالتزامات اختلافًا بينًا، سواء فى تطوير البرمجيات، أو فى العلوم الأساسية، أو فى تطوير السياسات، أو فى الهندسة. كما أنه من الصحيح أيضًا أننا لا يمكننا مطلقًا التأكد من شخصية من سوف يساهم بقطعة أساسية فى الأحجية. ومن الضرورى أن نكون شموليين بدرجة تكفى لاكتشاف كل الأفكار النيرة؛ فكلنا زبائن ومشاركون فى البيولوجيا المفتوحة. وتحتاج البنية الاقتصادية لتلك المشاركة إلى مزيد من الإيضاح.

فى الوقت الحالى، تتكون الزبائن الرئيسية لكلٍّ من درو أندى (من مؤسسة لبنات البناء البيولوجية) وريتشارد جفرسون (من كامبيا) لا من الهواة أو المغامرين ولا المهندسين، بل وليس حتى من شركات كبيرة، وإنما من طلبة ومؤسسات وحكومات. ومؤسسة لبنات البناء البيولوجية وكامبيا هى ذاتها مؤسسات لا تبغى الربح ويأتى تمويلها، حتى الآن، من منح وهبات وليس من أتعاب، مع إمكانية التوصل إلى التكنولوجيا كهدف معلن وليس الإنتاج وجمع المال. والأسواق التى تتنافس فيها تلك المؤسسات على التمويل تعطى قيمة للاختراعات والابتكارات مع التعهد بإحداث تغيير فى العالم. وفى الآونة الراهنة لا تستمد مؤسسة لبنات البناء البيولوجية ولا كامبيا غالبية تمويلها من بيع القطع أو التراخيص المفتوحة المصدر فى الأسواق المفتوحة، وبذلك فهى لا تعتمد على المبيعات فى تمويل أموالها، *ولا يجب أن يكون الأمر كذلك*. وإذا ما نجحت مؤسسة لبنات البناء البيولوجية وبيولوجيا المصادر المفتوحة فى جعل نماذجها تعمل لحسابها وفى سبيل زبائنها، فإن ذلك سوف يمنحها المزيد من القوة. ولكن بقية الاقتصاد يعمل على أسس تبادل الأموال بالبضائع والخدمات.

ومن الجائز المجادلة بأن البنية الحالية للابتكار فى التكنولوجيا البيولوجية تعمل بصورة مرضية: فعندما تطرأ لك فكرة فسوف تبادر بالبحث عن تمويل مبدئى، وتدفع مصاريف الحصول على براءة، ثم تجمع المزيد من المال. ويعتمد هذا النمط من الابتكار

على توفر التمويل برأسمال مُجَازِف، وهو الذى لا مراء فى أنه حقق نتائج مبهرة على مر السنين فى وادى السليكون. غير أنه ليس كل الرأسماليين المجازفين لديهم اللمسة الذهبية، ولا ينجح نجاحًا حقيقيًا إلا جزء صغير من الشركات الممولة تمويلاً مجازفًا. وتتجه تلك الشركات إلى الأحجام الكبيرة للمبيعات، وإلى عرض أسهمها على الجمهور، وربما تستحوذ عليها شركات أكبر منها، مما يخلق عائدات تغطى الاستثمارات المجازِفة الأخرى. ومن الواضح، وبناءً على الأدلة من وادى السليكون، أن ذلك يمثل وسيلة معقولة للحصول على المال للرأسماليين المجازفين. غير أن هذه الطريقة فى إدارة الأعمال تشكل إستراتيجية شاقة لبناء قاعدة تكنولوجية. والبراءات التى تملكها شركات أصابها الإفلاس، بل وحتى تلك التى تبقى على قيد الحياة ولكنها لا تحقق شيئًا من الناحية المالية، لا تخدم المصلحة العامة وقد تنتهى بها الحال إلى أن تستولى عليها أطراف أخرى وتستخدمها فى تثبيط الابتكارات. ومن الجلى أن الطريقة التى نمول بها الابتكارات فى التكنولوجيات البيولوجية تحتاج إلى بعض التعديل من أجل تعظيم فوائد تلك الابتكارات. والبديل لذلك هو؛ أنه إذا استمرت تكاليف الابتكارات فى الانخفاض وإذا مارس مزيد من المستثمرين بيولوجيا الجاراجات (انظر الفصل الثانى عشر)، فإن نموذج الرأسماليين المجازفين قد يجد نفسه وقد خسر المنافسة فى الأسواق التى عمل على خلقها.

وإذا ما تطلعنا إلى المستقبل فعلينا أن نتخيل نظامًا ماليًا وقانونيًا (١) يتيح حماية قوية للقطع المنفردة إذا كانت لتلك القطع قيمة اقتصادية إذا استخدمت بذاتها، و (٢) تيسر تزامنيًا الترخيص العام للقطع عندما تكون القيمة الاقتصادية قد نشأت من تجمع عدد من القطع مكونة وحدة أكبر حجمًا. وهذان المطلبان المتباينان يعززان نماذج أعمال شديدى الاختلاف، وهو لا يفيد سوى فى تعقيد الموقف. وكما ذكرنا فى الفصل السابق، عندما يتعلق الأمر بإصلاحات البراءات، فإن شركات البيوتك الكبرى القلقة من البراءات الخاصة بالجينات والجزيئات الفردية تجد نفسها فى مواجهة مع شركات التكنولوجيا التى تحتاج لحرية الحصول على عدد كبير من القطع.

فى نهاية المطاف، يتعين علينا أن نخلق نظامًا يُسَهِّلُ منح حقوق حصرية للدارات البيولوجية *المعقدة*، وهو نظام يتحمل «المطورون» الفرادى استخدامه. وهذا المطلب يشكل جزءًا من البيولوجيا المفتوحة مثلما يحافظ على حرية التوصل إلى التكنولوجيا؛ ومن الواضح أن المقدرة على تحديد استخدام تصميم جديد كانت لها تأثيرات عميقة على الابتكارات فى مجال البرمجيات. وفى الوقت الحالى لا يوجد مسار واضح لخلق مثل ذلك النظام فى الابتكارات البيولوجية أكثر من الاعتماد على البراءات، غير أن درسًا من قطاع آخر من الاقتصاد قد يكون ملْهِمًا.

الإنصات إلى المصدر

إن رحلة قصيرة إلى عالم جد مختلف من الابتكار والملكية يمكن أن يساعدنا على إعادة تخيل تلك المفاهيم فى البيولوجيا. ويذكر دافيد بيرن،

> فى الماضى، كانت الموسيقى شيئًا استمعتَ إليه وخَبَرْتَهُ – كانت احتفالية اجتماعية بمثل ما كانت احتفالية موسيقية ... كانت أمرًا شعبيًا وأحيانًا يهدف إلى المنفعة. ولم يكن بمستطاعك أن تأخذها معك إلى منزلك، أو تنسخها، ولا أن تبيعها كسلعة (فيما عدا الموسيقى الصحائفية(*)، ولكن تلك ليست موسيقى)، بل ولا تستطيع أن تسمعها مرة ثانية. كانت الموسيقى تجربة، متصلة اتصالاً وثيقًا بحياتك. وقد تدفع نقودًا فى سبيل أن تستمع إلى الموسيقى، ولكنها بعد أن تفعل ذلك، تختفى وتتحول إلى مجرد ذكرى.
>
> ولقد غيرت التكنولوجيا كل ذلك فى القرن العشرين. وصارت الموسيقى – أو على الأقل الصورة المسجلة منها – مُنْتَجًا، وشيئًا

(*) الموسيقى الصحائفية هى الموسيقى المكتوبة على النوتة، مقابل الموسيقى السماعية التى يقتصر الأمر على الاستماع إليها. (المترجم)

يمكن شراؤه وبيعه ومبادلته، وإعادة عزفها بصورة لا نهائية بأى سياق. ونتج عن ذلك انقلاب فى اقتصادات الموسيقى[٢٩].

وطوال غالبية التاريخ الإنسانى، لم تكن ثمة من وسيلة للاحتفاظ بنسخة من أداء موسيقى على وسائل مادية. وتستطيع أن تتذكر ما سمعت، أو بمقدورك أن تقرأ الموسيقى الصحائفية وتسمع الألحان فى رأسك، أو تعزف على آلة أو تغنى؛ وإذا ما حاولنا تطبيق تشابه فضفاض فنقول إن «الكود المصدرى» للموسيقى هو الأداء، مع استخدام الموسيقى الصحائفية أو الذاكرة كعامل مساعد فى تذكر أين كانت كل علامة موسيقية، ومتى. والموسيقى الصحائفية لا تجسد سوى التمثيل المادى للموسيقى دون أن تجربها بصورة شخصية.

والموسيقى الصحائفية من هذا المنظور هى مجرد بيئة تخزين، ومثل الاستخدامات الأخرى للورق، قد حل محلها السليكون واللدائن والزجاج ، وهى وسائل التخزين الرقمى. وبالمثل، نجد أن اختراع لفافة البيانو (البيانولا)، وفيما بعد الجراموفون، قد أوجد القدرة على تخزين «الكود المصدرى» للموسيقى على وسائط مادية على صورة «برنامج» يمكن تشغيله على آلات ميكنة. وفيما بعد عمل الراديو كقناة توزيع لكل من الأداء المسجل والمباشر.

ولقد ترتب على نشأة وسائل الإعلام المسجلة ظهور فرصة للحصول على ثمن اقتصادى نشأ من رغبة المستمع فى الاستماع إلى أصوات بعيدة زمانيًا ومكانيًا عن مكان إنتاجها الأصلى. وفى بادئ الأمر احتاج إنتاج التسجيلات وتوزيعها إلى بنية تحتية هائلة ورأسمال ضخم، ونمت صناعة جديدة لتعزيز تلك الأنشطة.

وفى القرن العشرين، سيطرت تكاليف التسجيل والتوزيع والتسويق على اقتصاديات صناعة الموسيقى، وكلها عوامل استفادت من النظام التدرجى. فالصناعات التى تتركز فيها التكاليف فى الإنتاج، كما أوضحنا فى الفصل العاشر، تنزع إلى أن تكون تحت سيطرة شركات كبيرة تستطيع تحمل تدعيم تلك الأنشطة ذات النطاق الواسع.

ومن الجلى أن ذلك النموذج لم يعد سارياً فى صناعة الموسيقى. فالمبيعات تتدهور بسرعة، وثمة قطاع متزايد من هذه المبيعات (وصلت الآن إلى نحو النصف) على صورة رقمية[٣٠]. وفى الآونة الراهنة، تجنح التعاقدات بين الأسماء التجارية والفنانين إلى التعامل مع التنزيلات من الإنترنت بوصفها ألبومات، فتحصل شركات التسجيلات على نفس النسبة من ثمن مبيعات النسخة الإلكترونية مثل النسخة الصلبة، على الرغم من انخفاض تكاليف الإنتاج[٣١]. ومن الجلى أن ذلك الوضع لا يمكن أن يدوم.

ومع ظهور تكنولوجيات حديثة بدأت المعايير ذات الصلة بصناعة الموسيقى فى التغير. ويبدو أن قدرة الوسطاء على الاستيلاء على حصة كبيرة من الأرباح فى مجال تسجيل الأصوات على وسائل مادية كانت أمراً مؤقتاً. ومع تدنى مبيعات الصناعة فإن الإنتاج والتوزيع المركزين لوسائل الإعلام فقدا جاذبيتهما كأهداف تنافسية لرؤوس الأموال. فقد أتاحت التكنولوجيا وجود هذا القطاع من الاقتصاد ونموه، والآن تُضعفُ التكنولوجيا من شأنه. وللمرة الثانية غيرت التكنولوجيا من مسألة القيمة المالية. وأُعيد توزيع القيمة الاقتصادية بمعايير أصغر.

والآن يستطيع أى شخص أن يجرب حظه فى صناعة الموسيقى وتسويقها. فقد تدنت تكلفة تسجيل ونسخ كلٍّ من وسائل الإعلام والنسخ الإلكترونى إلى ما يقرب الصفر[٣٢]. وبالفعل، بات العديد من الفنانين يمارسون بصورة متزايدة تسجيل وإنتاج موسيقاهم بأنفسهم، مما يجبر الأسماء التجارية على البحث عن دور جديد يلعبونه. وما كانت تمارسه المؤسسات فى الواقع من تملكها للموسيقى والقيام بتسويق الفنان بوصفه علامة تجارية، قد صار الآن مجرد واحدة من النهايات لأنماط مختلفة من الصفقات، مع وجود نموذج «افعلها بنفسك» كنهاية أخرى. وفيما بين هاتين النهايتين ثمة تنظيمات تشمل الحصول على الترخيص والنشر أو المشاركة فى الأرباح أو اقتصار ذلك على التصنيع والتوزيع. وقد بدأ هذا النمط من النظم الاقتصادية يتخذ شكلاً مشابهاً لباقى الأنماط الموجودة فى بقية الاقتصاد. وبمعنى آخر، ومع انخفاض تكلفة المشاركة فى الأسواق وتكاليف وصولها إلى المستهلكين، فإن النموذج الموحد

للأسماء التجارية المهيمنة على عالم التسجيل قد تفتت إلى مشهد أشد تعقيدًا وملىء بالثغرات العديدة.

ومع تزايد النقل الإلكترونى للموسيقى عبر الإنترنت، مارست صناعة الموسيقى ضغوطًا كبيرة لتمرير قانون حقوق الملكية الألفية الرقمية فى الولايات المتحدة. وقد شدد هذا القانون العقوبات على انتهاك حقوق الملكية بالنقل الإلكترونى للملفات ونص صراحة على عدم مشروعية التحايل على إجراءات حماية النسخ الرقمية للمواد المحمية بحقوق الملكية[٣٢]. ولا يبدو واضحًا حتى الآن ما إذا كان هذا القانون سيساعد حقًا الاقتصادات الثرية لصناعة التسجيلات - فالقرصنة لا تزال متفشية، والفنانون تتزايد محاولاتهم فى سبيل تحقيق اتصالات مباشرة مع معجبيهم - ولكن القانون أدى إلى حدوث تغييرات جوهرية فى التأثيرات القانونية، ومن ثم الاقتصادية، لتحركات المعلومات.

إن المغزى الوثيق لتأثير تلك التغيرات على مستقبل التكنولوجيا البيولوجية لهو مغزى ذو شقين. أولهما، أن قوانين الملكية الفكرية ليست مصنوعة من الحجر. فالقوانين يمكن تغييرها لكى تعكس التقدم فيما يمكن اعتباره فنًا وتصميمات أو تتغير استجابة لنشأة تقنيات جديدة إما أنها تهدد سلسلة القيم القديمة أو تفتح الباب أمام احتمالات نشأة تقنيات جديدة. وفى حين تغطى حقوق الملكية فى الوقت الراهن المحتوى والبراءات تغطى حاليًا الوظيفة، فإن تلك الأوضاع ليست ثمة من مبررات لأن تكون أوضاعًا مستديمة.

وثانيهما، إن فكرة ما يمكن اعتباره «منتَجًا» فى صناعة الموسيقى هى فكرة متغيرة، مع تزايد اعتماد القيمة المادية على خبرات المستمع. وبالمثل، ومع تدنى التكلفة، فإن إعادة تكوين سلَسلات الدنا بغرض السيطرة على أنظمة وإنتاج أشياء، سوف تشكل جزءًا أصغر من التكلفة الإجمالية. ولقد باتت سلَسلة الدنا وتخليقه من السلع بالفعل. وقريبًا سوف يصبح التصميم وتوصيف القطع والدارات الناتجة أثمن جزء فى بناء قطع بيولوجية جديدة. وسوف تصبح المعلومات الإلكترونية التى تحدد الوظيفة

البيـولوجيـة هى «المصـدر» فى هذه الحـالة، وهـو الشىء الذى يـهم الناس وله قـيمتـه الاقتصادية.

ولقد أدت التغيرات التكنولوجية إلى قلب بنية صناعة الموسيقى بصورة جوهرية، وحولت المنظمات ورؤوس الأموال الواسعة النطاق والتى كانت فى السابق تشكل ميزة، حولتها إلى عبء ومصدرٍ للإعاقة. وهو تغير ضئيل للمجتمع ككل، على الرغم من الدور الواسع المدى للموسيقى فى الحضارات وأنظمة الاقتصاد الإنسانية. وعلى النقيض من ذلك، نجد أن تغيرات مشابهة فى تكنولوجيات أخرى لا مناص من أن تكون تأثيراتها جوهرية. فنحن نعيش فى عصر تضع فيه التكنولوجيا قوة متزايدة فى أيدى الأفراد أكثر مما جرى فى أى وقت من تاريخ الحضارة الإنسانية.

الثورة خلفنا

إن التـزايد العـالمى فى القدرات على الاتصـال والابتكار سـوف تكون لهـا آثار عميقة على بنية الإنتـاج وبالتالى على بنية الاقتصـاد. ولعل الوسائل المستخدمة حاليًا فى منح حق حصرى لنواتج أعمال الفن والعلم قد عفا عليها الدهر بالفعل، غير أن إدراك ذلك لم يـبدأ بعدُ. ولعـل الوقت قـد حـان لحدوث تغيـرات فى وسائل منح الحقوق الحصرية.

لم يرد ذكـر البـراءات ولا حـقوق الملكيـة الفكرية فى الدسـتـور الأمـريكى. ولقـد استُمِدَّتْ كلتاهما من ممارسات أوربية يصل عمرها إلى عدة قرون. وبالتالى لا يبدو أن الإطارين القـانونى أو الاقـتـصـادى اللذين يحكمـان الملكيـة الفكرية واللذين تمت صياغتهما فى الفترة ما بين القرنين السادس عشر والعشرين، لا يبدو أنهما مناسبان لعالم يتم فيه التبادل بين البِتات والذرات. ويتزايد تنوع وانتشار وسائل تنظيم الذرات ووضعها فى حالة حركة، مع تخزين ونقل التعليمات الخاصة بذلك على صورة بِتات من خلال تنوع كبير للوسائل. ومن الجلى أن البراءات لها أهميتها بالنسبة لى فى الوقت

الحالى بوصفى من المستثمرين فى الوقت الحالى: وربما تقل هذه الأهمية فى العشر سنوات القادمة. وقد يتفاقم تخلف البنية الحالية لقوانين الملكية الفكرية حول العالم عن التكنولوجيا أكثر من تخلفها الحالى.

ومن الجائز أن الإستراتيجية التى تتبعها حاليًا مؤسسة لبنات البناء البيولوجية فى إتاحة القطع على الشيوع العام سوف تتحول ببطء إلى أن تسيطر على مجال الابتكار. وقد يشكل مجرد الخروج من الإطار الحالى للملكية الفكرية اختراقًا اجتماعيًا اقتصاديًا يماثل «حق اللاملكية» وقد تكون هى «نقطة التحول واللاعودة»، بعدها يصبح تملك الوسائل والأشياء أقل أهمية من الحصول على المعلومات.

ولقد وصل التقدم بالتكنولوجيا إلى أن باتت المعلومات المتعلقة بتصميم المصنوعات البيولوجية أكثر أهمية للأمن والسلامة المادية والاقتصادية من الأشياء التى تصنعها تلك التصميمات. وتعتمد القيمة الاقتصادية للإنتاج المركزى على المزايا التنافسية لطرف ثالث فى إنتاج أشياء للمستهلك. فإذا ما تدنت أهمية الإنتاج المركزى بسبب التبادل بين المواد والمعلومات، فستتركز القيمة فى المعلومات.

والأمر الأهم إذن هو أن حماية قيمة المعلومات بصورة عامة أمر عسير عندما تكون البنية التحتية موجودة بالفعل لإعادة إنتاجها بمجرد الرغبة فى ذلك. وفى خلال سنوات قليلة سوف تؤثر هذه الظاهرة بقوة فى اقتصادات التكنولوجيا البيولوجية، مثلما يحدث اليوم من تخلى ورثة شركة نابستر (Napster) عن نظام «تبادل الأنداد» (peer-to-peer) (*). لتبادل البيانات. وفى خلال فترة زمنية قصيرة نسبيًا، والنسبية

(*) نابستر هى شركة لبيع الموسيقى على الشبكة العنكبوتية بنظام «التشارك فى الملفات بين الأنداد» (peer-to-peer data sharing)، سواء بتنزيلها (downloading) أو برفعها (uploading) بحيث يتمكن كل مستخدم من الدخول على كمبيوترات الآخرين وتنزيل ما يريده. ويقتصر استخدامها على الأغانى والأفلام، وهى خدمة مجانية واسعة الانتشار اليوم. (المترجم)

هنا تعود على فترة حياة مؤسسات مثل آى بى إم وديبونت ونوفارتيس، فإن الأجهزة القادرة على سلسلة الدنا وإعادة تخليقه وبالتالى القادرة على الهندسة العكسية لأى تكنولوجيا مبنية على الدنا (وهى الحياة كما نعرفها)، سوف تكون موجودة على مناضد المعامل حول العالم وربما فى العديد من الجاراجات والمطابخ. وفى مثل هذا العالم، كيف ستتمكن أى مؤسسة، تجارية كانت أو من أى نوع آخر، أن تبقى على قيد الحياة معتمدةً على معلومات مملوكة لملاك؟

ولو وسعنا نطاق النقاش قليلاً فعلينا أن نتساءل عما سيحدث للتجارة عندما تكون المعلومات من الوفرة، بحيث تتيح استنساخ أنظمة بيولوجية. وما قيمة براءة اختراع إن لم توجد حركة تجارية تتعامل مع الأشياء أو العمليات التى يُدَّعى أنها اختراعات؟ وماذا ستكون فوائد البراءات الخاصة بالتقنيات البيولوجية؟ وكيف تسهم تلك البراءات فى المصلحة العامة؟ وعلى الرغم من المظهر الخارجى الذى يوحى بأنها تمنح – فإن البراءات لا تمنح ملكيةً للأشياء أو العمليات وإنما تتيح حقًا مؤقتًا فى استبعاد شخص آخر من الاستفادة الاقتصادية من مبيعاتها.

وعندما يصبح تخليق الدنا فى نهاية المطاف أمرًا ممكنًا وفقًا للرغبة بتكاليف متدنية ثم تشغيل هذا «البرنامج» فى كائن يختاره المرء، فقد لا يكون ثمة سوق للشىء الذى يصنعه البرنامج. وفى مثل ذلك العالم تكمن القيمة الحقيقية للدنا فى محتواه المعلوماتى. والأموال الوحيدة التى سوف تتبادلها الأيدى هى ما يُدفَعُ مقابل مُخلِّقِ الدنا والكواشف (المعملية) والمواد الخام اللازمة لتشغيل المُخلِّقِ وغيره من الأجهزة.

وكما يتضح جليًا من الفصول السابقة لهذا الكتاب، فإن التكنولوجيا التى يتطلبها تطبيق تلك البنية التحتية لم تتوفر بعدُ. كما يجب أن يكون واضحًا، على الأقل فيما يتعلق بالتطبيقات البسيطة، أنها ليست بعيدة المنال. ويكمن الفرق بين هذا العالَم والعالَم الحالى هو فى الدرجة وليس فى تحولات جوهرية فى القدرات التكنولوجية.

ونحن لا نحتاج إلى البحث عن وسيلة لفتح أبواب الابتكار عنوة؛ فهى تنفتح ببطء منذ أكثر من قرن، وإن كانت تتوقف من آن لآخر.

فإن كانت التماثلات التى عرضناها بدءًا من الفصل الأول إلى الفصل السادس بين السيارات والطيران والحاسبات والبيولوجيا تعلمنا شيئًا، فهو أنه بمجرد أن يبدأ تطوير نظام هندسى فى مجال من مجالات الجهود البشرية، وبخاصة عندما تبدأ فائدته الاقتصادية فى التكشف، فإن من المستحيل إيقافه. وقد يتباطء التقدم بسبب صعوبات تكنولوجية، ويشير خط التكنولوجيا الذى تناولناه فى الفصل الخامس إلى أنواع الاستثمارات التى تسهل الانتقال إلى الهندسة البيولوجية الحقيقية. وثمة جهود هائلة تتعلق بالأساسات المطلوبة تسير بالفعل على قدم وساق (انظر الفصول ٦ إلى ٨). ويبدو أن البيولوجيا التخليقية والتكنولوجيات المتعلقة بها هى عناصر جوهرية فى التعامل مع الأخطار الطبيعية والاصطناعية، كما أثبتنا فى الفصل التاسع. ويتطلب إنتاج الابتكارات المطلوبة لمواجهة تلك الأخطار تمكين الأفراد والشركات الصغيرة من المساهمة، وعلى الرغم من أن الحظر بدعوى تحسين الأمن قد يُحَجِّمُ مؤقتًا الولوج إلى الأجهزة، وقد يضع قيوداً على ممارسة مهارات بعينها، فإن تلك الإستراتيجية قد ثبت عدم جدواها تاريخيًا وسوف تضعف الأمن فى حقيقة الأمر على المدى القصير (انظر الفصلين ٩ و١٠). وأفضل ما يضمن الأمن المادى والاقتصادى هو الابتكار المتنوع والمفتوح، الذى سوف يسهم بصورة أكبر فى النمو الاقتصادى (انظر الفصول ١٠ و١١). وقد يتباطأ التقدم بالإصرار على البراءات على حساب المصلحة العامة (انظر الفصلين ١٢ و١٣)، ولكن وبغض النظر عن شروط التشارك فى الملكية الفكرية، أو سرقتها، فقد شاهدنا بالفعل تغيرات جوهرية فى بنية الابتكار والإنتاج.

لا نستطيع العودة إلى الوراء. فقد تغير العالم بالفعل بصورة لا رجعة فيها، وحين بدأت التأثيرات الاقتصادية والاجتماعية تتضح بالفعل، فإن إدراكًا أعظم لهذه التغيرات بدأ يشرق ببطء. والسؤال الذى يتعين علينا مواجهته هو كيف نتجه إلى الأمام. فالثورة قد صارت خلف ظهورنا.

الفصل الرابع عشر

ما الذى يصنع ثورة؟

أحيانًا تظهر الثورات كنوع من الإدراك المتأخر، نتيجة لفوران لم تره أنت وهو قادم، أو نتيجة لتغيرات لم يُسَوِّقْ لها أحد ولا ادعى أحدٌ الفضل لنفسه فى حدوثها. وفى الوقت الحالى ثمة ثورة جارية، تتقدم فى هدوء وسط فهرسة القطع وسَلسَلَة القواعد. ونحن قد بدأنا لتونا نفهم القوة التى بين أيدينا.

وتَذَكَّر أن المنتجات المستمدة من جينومات معدلة تشكل بالفعل ما يعادل نحو ٢ بالمائة من إجمالى الناتج القومى الأمريكى، مع نمو قيمتها المالية المطلقة بما يساوى ١٥-٢٠ بالمائة سنويًا. وفى الفترة ما بين ٢٠٠٦، ٢٠٠٧، زادت القيمة المالية للتطبيقات الصناعية والزراعية للتكنولوجيا البيولوجية على مثيلاتها فى مجال الرعاية الصحية. وهذا فى حد ذاته يمكن اعتباره ثورة، ويشير إلى تصاعد الطلب على المنتجات المصنوعة باستخدام التقنيات البيولوجية، وهى منتجات لابد أن تكون لها سمات واضحة الفائدة ويعتمد عليها لكى تنافس فى الأسواق.

وارتباط التكنولوجيات البيولوجية بالأسواق هو أمر جوهرى، لأنه بدون الطلب لن تكون ثمة استثمارات تسمح بتحويل المخترعات إلى ابتكارات. وفى عالم تُصنع فيه المنتجات بواسطة التصنيع البيولوجى، فإن انتشار الابتكارات يكاد يكون فى حكم المؤكد أنه سيكون متشابكًا مع بنية اقتصادية وسياسية جديدة وغير مألوفة.

مـا نوع التكنولوجيـات السيـاسيـة والاقـتـصـادية التي سوف تؤثر في الفـوران الجـاري في تطوير التكنولوجيات البيـولوجية وتطبيـقـاتها، أو تتـأثر به؟ يقـودنا هذا السـؤال إلى التـفكير في الثورات بصـورة عامـة. ويوضح تفـحص الثـورات داخل أطُرٍ تاريخية محددة دور العوامل المساهمة المختلفة، وما إذا كان المشاركون يدركون ما كان يحدث وقتئذ. والنوع الحربي هو من بين أكثر الثورات تعرضاً للدراسة، وهو موقع مثير للاهتمام لبدء التفكير في الأحداث الراهنة.

الفرص السانحة والأخطار في الاستخدامات العسكرية للتكنولوجيات البيولوجية

إن أي تناولٍ لمستقبل التكنولوجيات البيولوجية لن يكون مستكملاً بدون تفحص احتمالات التطبيقات العسكرية. وسوف يكون من السذاجة بمكان ألا نتوقع أن يكون العسكريون حول العالم مهتمين باستخدام التكنولوجيات البيولوجية الجديدة، لأن المؤسسات العسكرية دائماً ما تستغل كل ما هو جديد في سبيل أن تحقق ميزات على أعدائها. كما أنه يتوجب على المراقبين، في حالة التكنولوجيات البيولوجية بصفة خاصة، أن يتفحصوا عن كثب الكيفية التي تستثمر بها المؤسسات العسكرية والأمنية في نشر البيولوجيا وإلى أي مدى.

وأول تطبيقات عسكرية في البيولوجيا تتبادر إلى أذهان غالبية الناس هي استخدام الجراثيم المُمْرِضة كسلاح. وفي رأيي أن تحويل التكنولوجيا البيولوجية إلى سلاح بهدف تطوير جراثيم مُمْرِضة جديدة لمجرد دراسة خواصها هي أكثر الاحتمالات إثارة للفزع في العقد القادم. غير أنه يتعين علينا أن نفرق بين تطبيقات الدفاع البيولوجي واستخدامات التكنولوجيا البيولوجية باعتبارها عاملاً مساعداً وفي الإنتاج.

وثمة استخدامات عسكرية بعينها قد تفضى إلى نهايات عديدة مفيدة. ولقد ترتب على القلق المعاصر حول الإرهاب البيولوجى استثمارٌ مهم فى سبيل التوصل إلى وسائل اكتشاف جديدة، قد تنتهى إلى تطبيقات مدنية تشخيصية فى مجال الرعاية الصحية وإلى هندسة أدوات للأنظمة البيولوجية.

بل ومع الابتعاد بصورة أكبر عن الأسلحة أو الإجراءات المضادة، فإن التبنى العسكرى للتكنولوجيات البيولوجية فى التحولات اللوجستية والتموينية قد يؤدى إلى اقتصاد كبير فى الأموال ويخفض بصورة مثيرة من التأثيرات المناخية للعمليات العسكرية. وسوف يؤدى الإنتاج البيولوجى لوقود الطائرات إلى جعل الاستخدام العسكرى للتكنولوجيات البيولوجية متماشية مع باقى جوانب الاقتصاد. ويشكل سلاح الجو داخل وزارة الدفاع الأمريكية أكبر مستهلك للوقود، وكل زيادة فى أسعار برميل البترول مقدارها دولار واحد ترفع النفقات السنوية بمقدار ٦٠ مليون دولار[١]، والطائرات العسكرية فى كل أفرع الأسلحة مسئولة عن ٧٣ بالمائة من استخدامات الوقود، وكل زيادة فى أسعار البترول مقدارها دولار واحد ترفع النفقات الإجمالية بمقدار ١٣٠ مليون دولار[٢]. ومن الجلى أن تذبذبات الأسعار هى أمر باهظ التكلفة لوزارة الدفاع ومن العسير إدماجها فى التخطيط. وبالتالى فإن احتمالات استبدال وقود النفاثات بوقود منتج بيولوجيًا بما يعادل ٥٠ دولارًا، كما ذكرنا فى الفصول السابقة، يمثل توفيرًا هائلاً للعمليات العسكرية يبلغ بليونات عديدة من الدولارات وتحسنًا مثيرًا فى ثبات النفقات المتوقعة. وبالمثل، إذا اعتبرنا أن وزارة الدفاع الأمريكية بلد مستقل فإن ترتيبها يبلغ السادس والثلاثين فى الاستخدام الإجمالى للوقود بين دول العالم، مما يجعل من وزارة الدفاع مصدرًا كبيرًا لانبعاثات الغازات الدفيئة؛ واستخدام وقود لا يحتوى على كربون سوف يقلص بصورة كبيرة الأضرار المناخية الناتجة[٣].

وفى حقيقة الأمر، فإن استثمارًا عسكريًا كبيرًا فى التكنولوجيات البيولوجية سوف يعطى دَفعة مالية هائلة يتبدى أثرها فى البنية التحتية التى فى طور التطوير وكذلك فى الاقتصاديات المماثلة. ويوضح تاريخ الحاسبات والطيران بجلاء الدور التاريخى المهم للتمويل العسكرى للأبحاث لضمان الاستثمار فى الإنتاج، وبهذا تتيح لصناعات جديدة كاملة أقدامًا راسخة.

إن متابعة تطور التكنولوجيا البيولوجية بهدف تخفيض نفقات العمليات العسكرية والصيانة هو نتيجة لخيار معين. وهو خيار متاح للعديد من المؤسسات العسكرية حول العالم، ولكنه، على الأقل حتى هذه اللحظة، ليس مسار العمل المطلوب والذى لا مناص من اتباعه من أجل ضمان سلامة بقاء بلد من البلدان أو جنوده. ووجود خيار وكونه متاحًا أمام العديد من المؤسسات حول العالم هو من العوامل التى يستخدمها المؤرخون من أجل فهم مسيرة النزاعات.

وقد ميز كل من ويليامسون مرى ومكجريجور نوكس، وهما من المحاربين القدماء فى فيتنام، ميزا بين «ثورات عسكرية» كبيرة، فيها تدافعٌ للأحداث غير قابل للسيطرة يكتسح أمامه الأممَ والمؤسسات العسكرية"، وبين «ثورات فى الشئون العسكرية» تبدو سريعة التأثر بالتوجهات البشرية"[٤]، وكتب مارك جريمسلى، مستكملاً إيضاح هذا الفرق، "لا يسيطر الأفراد أو المجموعات على الثورات العسكرية: فهم لا ينشدون سوى مجرد النجاة منها"[٥]، وبهذا تكون الثورات العسكرية ظواهر تتجاوز العسكريين فتشمل الأنظمة الاقتصادية والمجتمعات. ونشاهد فى الجدول (١٤-١) أمثلة لخمس ثورات عسكرية حدثت فى القرون الأربعة الأخيرة[٦].

جدول (١٤-١) خمس ثورات عسكرية من القرون الأربعة الأخيرة

الثورة العسكرية ١: نشأة نظام الدول الحديثة فى القرن السابع عشر، والذى ارتكز على مؤسسات كبيرة من القوة العسكرية المنضبطة.

الثورة العسكرية ٢: الثورة الفرنسية فى أخريات القرن الثامن عشر وما بعده، التى مزجت بين السياسات الشعبية وشئون الحرب.

الثورة العسكرية ٣: الثورة الصناعية فى أواخر القرن الثامن عشر وما بعده، التى أتاحت إمكانية تسليح الجموع وإلباسها وإطعامها ودفع مرتباتها وتحريكها سريعًا إلى المعارك.

الثورة العسكرية ٤: الحربان العالميتان الأولى والثانية، التى جمعت ميراث الثورتين الفرنسية والصناعية ووضعت نمط حروب القرن العشرين.

الثورة العسكرية ٥: ظهور الأسلحة النووية، التى، بالمخالفة لكل السوابق، أبقت الحرب الباردة باردة فى المسارح الحاسمة فى أوروبا وشمال شرق آسيا.

ويقول مرى ونوكس:

> **يمكن فهم هذه الاضطرابات الخمسة بصورة أفضل من خلال استعارة جيولوجية: فهى زلازل. ولقد نتج عنها تغيرات فى الأنظمة السياسية والمجتمعات. وكان من المتعذر السيطرة عليها، أو توقعها، أو التنبؤ بها.**
>
> **والثورات العسكرية تعيد صياغة المجتمع والدولة وكذلك المؤسسات العسكرية. وهى تغير من قدرات الدولة على خلق وتوجيه القوة العسكرية. وتأثيراتها تراكمية. والدول التى فاتتها الثورات العسكرية المبكرة لا تستطيع بسهولة أن تقفز إلى النجاح فى الحرب بتبنيها الزينات الخارجية للتكنولوجيا الغربية(٧).**

ومما يسهم فى إدراك الفروقات بين الثورات العسكرية وثورات فى الشئون العسكرية تفحصُ أكثر تفصيلاً للكيفية التى يمكن بها تصنيف الثورات العسكرية الخمس التى أوردناها سابقًا إلى عوامل مساعدة. والجدول (١٤-٢) مأخوذ بتصرف من قائمة أوردها مرى ونوكس؛ وفى جميع الأحوال تتكون الثورات العسكرية وثورات الشئون العسكرية المرتبطة بها من تغيرات متشابكة تكنولوجية واقتصادية واجتماعية. وبهذا لا تشكل التطورات التكنولوجية فى حد ذاتها ثورةً، عسكريةً كانت أو غير ذلك.

جدول (١٤-٢) الثورات العسكرية وثورات الشئون العسكرية المتصلة بها

الثورة العسكرية ١: القرن ١٧ نشأة نظام الدول الحديثة والمؤسسات العسكرية الحديثة.

ثورة الشئون العسكرية المتصلة بها

١- إصلاحات تنظيم القوات فى المعارك، فى هولندا والسويد وفرنسا.

٢- ثورة فى البحريات حول أوضاع القوات فى البحر.

٣- الثورة المالية فى بريطانيا.

الثورتان العسكريتان الثانية والثالثة: الثورة الفرنسية والثورة الصناعية.

ثورة الشئون العسكرية المتصلة بها:

١- التعبئة العامة السياسية والاقتصادية، نشأة القومية والشعور القومى؛ الحروب النابليونية المصممة لإبادة العدو، التعليم والتدريب العام للضباط.

٢- القوة المالية والاقتصادية المستندة إلى التصنيع.

٣- الثورة التكنولوجية فى الحروب البرية والنقل (التلغراف، والسكك الحديدية، والسفن البخارية).

٤- البوارج ذات المدافع الكبيرة والأساطيل القتالية.

الثورة العسكرية الرابعة: الحربان العالميتان الأولى والثانية. جمعتا بين الثورات السابقة.

ثورة الشئون العسكرية المتصلةبها

١- الجمع بين تكتيكات الأسلحة والعمليات الحربية، الحرب الخاطفة، القاذفات الاستراتيجية، معارك حاملات الطائرات والغواصات، الرادار، الإشارات والمخابرات.

الثورة العسكرية الخامسة: الأسلحة النووية والصواريخ البالستية.

ثورة الشئون العسكرية المتصلة بها

١- الاستطلاع والضربات الجوية فائقة الدقة، الطائرات الشبح، الاتصالات والسيطرة بالحاسب، زيادة القدرة على الفتك للذخيرة «التقليدية».

وتسهم الجعجعة بالحديث عن الثورات العسكرية وثورات الشئون العسكرية فى إلقاء أضواء مبهرة عن الأنواع المختلفة للاستخدامات العسكرية المباشرة للتكنولوجيات البيولوجية. فقد استُخدِمت الجراثيم المرضة كأسلحة طوال غالبية أوقات التاريخ المسجل، وقد طورت الدول الحديثة أسلحة بيولوجية فى السابق. ويبدو أن تلك الأنشطة على مستوى الدول قد توقفت إلى حين.

ولما كان الأمر قد يصل بالتكنولوجيا البيولوجية لأن تصبح مصدراً لتهديد عسكرى، فلا مناص من وضعها فى الإطار الأكبر وهو إطار التغيرات الاجتماعية

والاقتصادية. ومع افتراض أن الحكمة والتعقل سوف يسودان وأن الدول ومؤسساتها سوف تحجم عن تطوير أسلحتها البيولوجية، وعندئذ ستصبح البيولوجيا مجرد جزء من أحجية أكبر حجمًا. وكما استكشفنا طوال هذا الكتاب، نجد أن انتشار البيولوجيا فى الاقتصاد بوصفها تكنولوجيا يعتمد على التفاعل بين عوامل اجتماعية وتنظيمية وعوامل السوق. ويذكر نوكس ومرى أن "التغيرات فى المجتمع والسياسة هى أكثر العوامل ثوريةً"[٨]. ويشير بزوغ تكنولوجيات جديدة وأنماط جديدة من التنظيمات الاجتماعية إلى أنه يتوجب أن يكون تعريف الثورة الحالية أكثر شمولاً.

ونجد أن الولايات المتحدة، ومعها دول أخرى كثيرة، مشغولة حاليًا فى «حرب» ليست ضد دولة بعينها وإنما ضد أفراد ومجموعات يمتلكون سلطات وقوة. والاسم الدارج اليوم لهذا القتال يجعله قتالاً ضد «الإرهاب»، الذى يُعَرَّفُ بأنه إستراتيجية تهدف إلى خلق اضطراب اقتصادى ورعب من أجل الدعاية أو بهدف فرض تغيرات فى السياسة. وهذا التعريف للإرهاب هو تعريف ذو حدود ضيقة سواء تاريخيًا أو عمليًا.

ويعتبر جاميه كاسكيو، وهو مخطط سيناريوهات وذو رؤية مستقبلية، ومن رواد ودعاة الاقتصاديات ذات المعلومات المفتوحة، يعتبر أن التحديات الحالية هى أمثلة لنزعات بازغة بعيدة المدى: "يبدو أن القوة العسكرية التقليدية عاجزة عن هزيمة عصيان ذى شبكات، تجمع بين عصر المعلومات بما يتسم به من انتشار للاتصالات والتعلم السريع وبين التخفى التقليدى لرجال حروب العصابات (بتعذر تمييزهم عن الجماهير) وتدنى احتياجاتهم ... ولقد كان من العسير دائمًا هزيمة العصيان بالقوة التقليدية، غير أن نموذج «الحرب المفتوحة المصدر»، حيث يمكن أن يمثل تعلم التكتيكات واختبارها وانتقالها بصورة رسمية وغير رسمية عبر شبكة منتشرة من رجال العصابات، تحديًا يستحيل على العسكريين التقليديين تجاوزه"[٩].

ولا يزال موضوع ما إذا كان تحدى «الحرب المفتوحة المصدر» يشكل تحدياً يتعذر تجاوزه، أمراً لم يتم التوصل إلى حل له بعدُ. غير أنه وبغض النظر عن أسباب الصراع الحالى، وبغض النظر عن النتائج السياسية لأى تكتيكات أو إستراتيجيات بعينها تُستَخدَمُ أثناء القتال، فإن مدى الصراع وتكلفته تجعلانه يبدو وكأنه ثورة عسكرية جديدة. والذين يُطلَقُ عليهم المقاتلون غير الشرعيين، وهم ليسوا جنوداً فى خدمة أية دولة معروفة وإنما يدينون بالولاء لأفكار وإيديولوجيات معينة، هؤلاء يستخدمون وسائل الاتصال والنقل الحديثة ويؤكدون استعدادهم على استخدام المدنيين والبنية التحتية كسلاح وكهدف فى نفس الوقت. وهم يستخدمون تكتيكات وتكنولوجيا تشكل، على الأقل فى حال اجتماعها معًا، تهديداً جديداً للمؤسسات العسكرية القومية. وقد استُخدِمت مواد شائعة وأجهزة استهلاكية، تم تجميعها لتُكَوِّنَ أجهزة تفجير مرتجلة، أحدثت إصابات جسيمة فى القوات البرية فى العراق وأفغانستان، واحتاج الأمر إلى تغييرات شاملة فى التكتيكات ومجهودات شاقة مستمرة فى سبيل تطوير إجراءات مضادة من جانب وزارة الدفاع الأمريكية[١٠].

وفى حين يستمر القتال فى أفغانستان والعراق، قُتِل بضعة آلاف من المدنيين حول العالم فى العقد الأخير فى هجمات استخدمت مواد يسهل الحصول عليها. والتعليمات لصنع قنابل باستخدام مواد شائعة منتشرة على الشبكة العنكبوتية، كما تنتشر التعليمات الشخصية المباشرة فى معسكرات التدريب حول العالم. وتوفر المعلومات والمواد ذات الصلة هى من سمات أنظمتنا الاقتصادية والاجتماعية وسيكون من الصعب تغيير تلك السمات، حتى لو توفرت الإرادة السياسية لاتخاذ مثل تلك الإجراءات. وفى حين قد يمكن إغلاق القواعد ومعسكرات التدريب ومراقبة الأفراد أو اعتقالهم، إلا أن الأسواق الكبيرة للمعلومات والمواد وتدفقها حول العالم قد وُجِدت لتبقى. والبيولوجيا هى مجرد عامل آخر يلعب دوراً. ولحسن الطالع، لم يحدث حتى الآن فى الصراعات الحديثة أن التكنولوجيا البيولوجية انتشرت أبعد من توزيع جراثيم

الأنثراكس عن طريق البريد داخل الولايات المتحدة فى أواخر عام ٢٠٠١. ويبدو أن ذلك كان عملاً إرهابياً محلياً منعزلاً بذاته(١١).

وليس من الواضح ما إذا كانت أى تكنولوجيا بيولوجية، وبخاصة تخليق الجينات، يمكن أن تزيد من القدرات المتاحة للأفراد. ويشكل تخليق الجينات فى حد ذاته تكنولوجيا قوية بعيدة حالياً عن متناول سوى قلة قليلة من المتمرسين فى هذا العلم. غير أنها إن اجتمعت مع القدرات على التصميم والتوصيل الإلكترونى لمعلومات السلسلة، والبريد السريع الذى يغطى العالم أجمع لتوصيل أشياءٍ من جميع الأحجام، فإن تخليق الجينات يصبح أمراً متاحاً وأداة شائعة الاستخدام.

وبالنظر إلى الأمام، ومع تزايد انتشار المهارات والمعرفة حول العالم، فسوف يصبح تخليق الجينات فى نهاية المطاف أقل اعتماداً على الإنتاج المركزى. وسوف يحدث ذلك حتى لو تم تحريم تخليق الدنا والحصول على تكنولوجيا تخليق الجينات، كما ذكرنا فى فصول سابقة، لأن الأفراد الذين يملكون معلومات كافية يمكنهم أن يصنعوا الأجهزة اللازمة باستخدام قطع ومعلومات متاحة بسهولة. وبذلك تتحدد معالم الثورة الحالية بواسطة مزيج من (١) معلومات واسعة الانتشار، و(٢) وسائل اتصال سريعة، و(٣) حرية الوصول إلى قطع وإمكانيات تصنيعية يمكن بواسطتها تجميع أسلحة أو أية تكنولوجيا أخرى بطريقة نمطية. فمثلاً، نجد أنه فى حين لا يبدو أن «أجهزة التفجير المرتجلة» فى حد ذاتها تهدد حياة أية دولة أو مؤسسة عسكرية، فإن الاتصالات الأوسع مدى والقدرات الصناعية التى تتيح صنع «أجهزة تفجير مرتجلة» والإستراتيجيات والتكتيكات المرتبطة بها هى تطورات لا تستطيع أية دولة أن تتجاهلها.

إن بذور الفوران التكنولوجى والاقتصادى الحالى فى حقيقة الأمر قد نبتت تدريجياً على مدى العقود الثلاثة الأخيرة، وكان نسبياً بعيدة فكرياً عن بيولوجيا يومها. وكما ذكرنا فى الفصول السابقة، فإن المفاهيم البازغة الخاصة بالمصادر المفتوحة

والابتكار المفتوح وإنتاج الأنداد قد أحدثت تغييرات جوهرية من دور الأفراد فى خلق الابتكار وانتشاره. وقد جَمعتُ معًا فى الجدول (١٤-٣) عددًا من التقنيات والأنشطة التى أرى أنها أسهمت فى تلك الثورة.

وتبدو بعض سمات التغيرات الاقتصادية والتكنولوجية والسياسية قابلة للسيطرة. ونحن نواجه، أو نعانى، من سمات أخرى لأنها أكبر أو أشد تعقيدًا من أن تُعالَجَ. وليست كل الثورات اختيارية ولا يتحتم أن تكون فجائية. وأحيانًا تتسلل الثورات إلينا؛ وغالبًا ما لا تتضح إلا باستعراض تذكرى للأحداث.

ثورة الابتكار المفتوح والمنتشر

إن كان تعريف ثورة عسكرية يعنى فى الماضى أنك إن فشلت فى اللحاق بواحدة فلن تستطيع أن «تقفز إلى النجاح» بشرائك لها في وقت لاحق، فإننا قد نجد فى العوامل المذكورة فى الجدول (١٤-٣) تعريفًا لنمط جديد من الثورات. وفى هذا النوع من الثورات، نجد أن المواد والمعلومات يمكن استبدالها، والبنية التحتية من اليسير بناؤها، والمهارات من السهل الحصول عليها. وعلى سبيل المثال، نجد أن العسكريين الأمريكيين قد اشتد اعتمادهم فى المراقبة على المركبات الجوية بدون طيار فى العراق وأفغانستان. غير أن العدو العسكرى على الأرض قد تعلم كيف يتجنب تلك المراقبة أثناء زرعه لأجهزة التفجير المرتجلة، وقد أصبحت وسائل المراقبة ذاتها موضع ابتكارات واسعة[١٢]. وقد يجد العسكريون الأمريكيون أنفسهم سريعًا معرضين لنفس المراقبة الجوية التى أدخلوها فى ميدان القتال بهدف الحصول على مزايا تكتيكية.

تشكل الطائرات ذات التحكم من بعد بؤرة اهتمام واسع من قبل مخترقى الحاسبات. وهناك جهود على مستوى العالم من الهواة للتنسيق بينهم على شبكة

الإنترنت والمشاركة في المعلومات الخاصة ببناء أنظمة أفضل للسيطرة والتزود بالطاقة والطيران الآلى، وإمكانات تتبع المسار بنظام تحديد المواقع العالمى (Global Positioning System, GPS)، وبالطبع أنظمة الاستطلاع الجوى[١٣]. ويستطيع أى شخص أن يتعلم من تلك الجهود. والمجتمع يعى احتمالات الاستغلال الشائن لشموليتها الصريحة. والشعور العام السائد بين المشاركين هو؛ أن مشاركة المعلومات أفضل من اختزانها، وأنهم يساعدون السلطات الحكومية على الاطلاع على ما هو ممكن من الناحية التقنية للهواة المتعلمين الذين لديهم حوافز[١٤].

جدول (١٤-٣) ثورات الشئون العسكرية التى تسهم فى الثورة العسكرية فى القرن الحادى والعشرين

الثورة العسكرية السادسة: مجموعات وأفراد لا علاقة لهم بالدول ويملكون قوة، تبادل المواد والمعلومات، الابتكار المفتوح وانتشاره.

ثورة الشئون العسكرية المرتبطة بها:

١- انتشار الاتصالات والمراقبة والتمويل الإلكترونى حول العالم.

٢- الاتفاقيات بين الدول لا تحد من قدرة الأفراد أو المجموعات على القيام بعمل ما، وربما كانت تحرِّض عليه.

٣- أفراد مستعدون للتضحية بحياتهم، واستخدام المدنيين فى الهجوم، هجمات على المدنيين على نطاق واسع بوصفهم أهدافًا تكتيكية للإرهاب وليسوا أهدافًا إستراتيجية وقت الحروب.

٤- هدف الهجمات هو الأضرار المادية والاقتصادية، أو مجرد إشاعة الخوف.

٥- سهولة الوصول إلى المواد الكيماوية والبيولوجية، وسهولة الوصول إلى البنية التحتية والمهارات اللازمة لتصنيع المواد الكيماوية والبيولوجية.

٦- سهولة الوصول إلى المكونات الميكانيكية والإلكترونية، وسهولة الحصول على المعلومات والأجهزة التى تستعين بالحاسبات، وكلها فى إطار ثقافة المخترقين الشائعة «صنّعه بنفسك».

٧- تبادلية المعلومات التصميمية والأشياء المحسوسة لأهداف التجارة والحروب.

يقوم المجتمع الكبير لمخترقى الحاسوب بتطوير نشط لإمكانات تصنيعية أكثر عمومية، بما تحويه من طابعات ثلاثية الأبعاد وأدوات وأجهزة وقاطعات تعمل بالليزر، وكلها تستخدم فى سبيل بناء أشياء جيدة. وأحيانًا ما تُنشر النتائج والطريقة والتصميمات على الملأ العام. وقد أتم مشروع «معمل فاب» التابع لمعهد إم أى تى (MIT Fab Lab) تجميع قائمة بأدوات وآلات يمكن شراؤها نظير مبالغ زهيدة، وإذا استُخدمت معًا أمكن تصنيع تنوع كبير من الأشياء ذات الوظائف:

> **«معمل فاب هو مجموعة من المنتجات الصناعية والأدوات الإلكترونية المتاحة فى الحوانيت، بواسطة برمجيات مفتوحة المصدر ... وحاليًا تشمل هذه المعامل قاطعات بالليزر تصنع هياكل ثنائية وثلاثية الأبعاد، وقاطعة علامات تحفر فى النحاس لتصنع هوائيات ودارات، وماكينات طحن عالية الاستبانة تصنع لوحات الدارات والأدوات الدقيقة، ومجموعة من المكونات الإلكترونية وأدوات البرمجة زهيدة الثمن، وآلات للتحكم فائقة السرعة ... وحاليًا يتكلف «معمل فاب» متكامل نحو ٢٥,٠٠٠ دولار للمعدات والمواد بدون تدخل من إم أى تى[١٥].**

وحتى الآن تم إنشاء عدد من «معامل فاب» فى لينجن آلبس بالنرويج، وكارتاجو فى كوستاريكا، وبابال بالهند، وبوسطون فى ماساتشوستس، وجلال آباد فى أفغانستان، وأماكن أخرى عديدة فى أفريقيا. وبشىء من التدريب يستطيع أى شخص

أن يستخدم «معمل فاب» لبناء ما يعن له، أو يكتفى بالتعلم. وثمة مشروع مماثل هو «فاب المنزلى Fab@Home » يهدف إلى تشجيع تطوير طابعات ثلاثية الأبعاد - «فابرات» (fabbers) (*) - قادرة على تصنيع أى شىء من حلويات على شكل زهور إلى إلكترونيات تؤدى وظيفة(١٦).

ويمكن الحصول من على شبكة الإنترنت على خطط الفابرات وقوائم بالقطع وبرمجيات لتشغيلها، مع الحصول على صناديق أدوات وطابعات مجمعة من منافذ البيع التجارية. وقد انخفضت أسعار الفابرات ذات المستوى الرفيع، والتى كان القصد الأصلى منها الاستخدام التجارى، وبذلك صار من المنتظر أن تصبح سريعًا سلعة مطلوبة من المستهلك، مما يتيح الطباعة فى المنازل على المعادن والأشياء المصنوعة من اللدائن؛ وكتبت جريدة الإيكونوميست تقول: "سوف تحدث المتعة الحقيقية عندما يصبح بمقدور البشر العاديين أن يطلقوا العنان لخيالاتهم. فإن تخيلتَ شيئًا فبمقدورك أن تصنعه"(١٧). وأحد أهداف المشاركين فى كلٍّ من «معمل فاب» و«فاب المنزلى» هو أن ينتهى بهم المطاف إلى خلق أدوات يمكن استخدامها فى إعادة خلق نفسها، لا يحد من هذا الهدف سوى حرية الوصول إلى الخطط والمواد الخام. ويتم الإعلان عن «ريب راب» (RepRap) بوصفها صورة مبكرة للطابعة التى «تعيد إنتاج ذاتها»، ومصدرها الشفرى يتم توزيعه عن طريق الإنترنت تحت مظلة «مكتب البراءات العامة» (انظر الفصل الثانى عشر(١٨)، وجدير بالذكر هنا أن «معمل فاب» على وجه الخصوص يشكل مجموعة من الأدوات تكفى تمامًا لبناء كل القطع التى يحتاجها تجميع مُخَلِّقٌ تقليدى للدنا من المواد الخام.

(*) الفابرات (التصنيع الرقمى) (fabber, digital fabrication) مصنع صغير متكامل يصنع الأشياء طبقًا لمواصفات رقمية. وهو ينتج أشياء صلبة ثلاثية الأبعاد يمكن استخدامها نماذج أولية.

والدرس المستفاد يتسم بالعمومية الشديدة: فليست ثمة عناصر مذكورة فى الجدول (١٤-٣) تبدو وكأنها تقتصر على العسكريين أو المقاتلين غير القانونيين. ومعنى ذلك أن العناصر الخاصة للاتصالات والتصنيع الحديثين والتى حاليًا تجبر أكبر المؤسسات العسكرية على ظهر الكوكب لأن تبادر إلى الابتكار السريع لكى تتكيف مع الحقائق القتالية الجديدة، هى جزء من ثورة اقتصادية أكبر وأعم وأشمل. ويمكن تعريف الثورة الاقتصادية الحالية بأنها تلك الثورة التى تترك أثرها فى بنية الابتكار ووسائل الإنتاج. وهو الأمر الذى يغير من قدرات الدول والمنظمات والأفراد على المشاركة فى العالم الحديث ويحقق احتياجات حلفائهم وتطلعاتهم.

الإطار الأكبر

إن تدفق المعلومات هو أمر محتوم. وليس ثمة من سبيل لعمل شىء لكبح ذلك التدفق؛ ولقد حدث ذلك الموقف قبل أن ندركه - نحن الجمهور العام، واعتمادنا على تلك التكنولوجيا قد جعل منها أمرًا لا يمكن لكل الدول والمنظمات أن تستغنى عنه. والهواتف المحمولة موجودة حتى فى أكثر الأماكن فقرًا فى أكثر دول الكوكب فقرًا، واستخدام الإنترنت يتبعها بسرعة. ولقد ترتب على التحسن الناتج فى الاتصالات تسهيل التعليم، وتحويل رؤوس الأموال، وجعل انتشار المعلومات الخاصة بالأسعار من مزارعى المناطق النائية على دراية بالمحصول الذى تتعين عليهم زراعته للحصول على أفضل العائدات من الأسواق.

كما أننا نشهد أيضًا تحسنًا عامًا ومنتشرًا فى القدرة على السيطرة على المواد. وتقع «معمل فاب» والطابعات الثلاثية الأبعاد المفتوحة المصدر فى المقدمة فى هذا الشأن. غير أنه ومع تنقل المصانع التقليدية حول العالم، فإنها تترك فى أعقابها مهارات وبنية تحتية. ولقد باتت الدول التى كانت وجهة تتجه إليها المصانع لسبب وحيد هو العمالة الرخيصة، باتت الآن تسهم فى الأسواق العالمية بمنتجاتها الخاصة

الجديدة. وهى عملية تفاعلية، كما يذكر ف. فاثيسواران فى جريدة الإيكونوميست: "تعمد الشركات الصينية والهندية إلى التعامل مع زبائنها المحليين بينما هم يُحَسِّنُون من نوعية إنتاجها إلى حد يمكنهم من البدء فى التصدير. ولقد سارت المؤسسات الكورية الجنوبية بالفعل فى نفس الطريق بإنتاج الإلكترونيات الاستهلاكية والسيارات – وفى تلك الأثناء أشاعت الخوف فى قلوب العديد من منافسيهم اليابانيين"[١٩]. إن نمو القدرات على الابتكار وانتشارها الجغرافى يحدث فى نفس الوقت الذى تتسارع فيه وتيرة الابتكار ذاته. وقد خلصت دراسة لشركة «بروكتور آند جامبل» إلى أن دورة حياة المنتجات الاستهلاكية قد انخفضت إلى النصف فيما بين ١٩٩٢ و٢٠٠٢[٢٠]. وبغض النظر عما إذا كانت الدولة أو المؤسسة كبيرة أم صغيرة، فإن مواكبة هذا العالم يحتاج إلى حرية الوصول إلى الأدوات والمهارات التى تتيح الابتكار السريع. ولا يعنى ذلك فقط حرية الوصول إلى الاتصالات والتصنيع كضرورة تكتيكية فحسب وإنما أيضًا تحسين تلك القدرات كهدف إستراتيجى. وبهذا فإن أية تغيرات فى السياسة بهدف تنمية الأمن المادى والاقتصادى يتعين أن تعترف بحقيقة انتشار الاتصالات وإمكانية تبادل البِتات والذرات. والاقتصاد الجديد، اقتصاد البِتات والذرات، هو اقتصاد عالمى بكل وضوح لا لبس فيه ولا تراجع عنه.

الزمن وحده كفيل بإخبارنا عن تأثيرات الاتصالات وانتشار التصنيع على حجم الابتكارات والإنتاج باستخدام التكنولوجيات البيولوجية. بل إن ذروة الأجهزة المعملية الخاصة بسَلسَلة الدنا وتخليقه موجودة بالفعل فى أسواق معقدة تحوى العديد من المتنافسين. ولا يبدو أن ثمة أية فائدة ترجى من عمليات التصميم والتجميع على نطاقات واسعة؛ فالخدمات التخصصية مثل تخليق الجينات سريعًا ما أصبحت سلعًا نظرًا لظهور عدد من المتنافسين. وحتى لو كانت الطبيعة السلعية لتخليق الدنا تدفع نحو الاندماج والتماسك، إلا أنه ما من دليل على أن متطلبات رأس المال ستكون عائقًا ذا شأن لدخول المتنافسين فى أى وقت. وهو قول صحيح على وجه الخصوص إن

استمرت التكلفة فى الانخفاض بصورة أُسية وتصاعدت فوائد الأتمتة (automation) وصارت مؤثرة على التكلفة (انظر الفصل السادس). وبالمثل، ومع إدخال مسارات إنتاج الأدوية والكيماويات والوقود فى كائنات أو فى أنظمة معملية، فإن العقبات التى تشكلها المهارات والتكلفة أمام استخدام الأنظمة البيولوجية وإعادة برمجتها سوف تتهاوى (انظر الفصول ٧ و٨ و١١).

وفى إطار انخفاض العقبات أمام الدخول وتدنى تكلفة الإنتاج، يتوجب على المرء أن يتساءل ماذا تبقى من مزايا للعمالقة. وقد تكمن الإجابة فى العلامات التجارية وضمان الجودة وتراكم الملكية الفكرية.

لقد كانت وصفة تصنيع حمض الأسيتايل ساليسيليك - الأسبرين - متاحة للجميع على الملأ العام منذ عقود ويمكن بسهولة تنفيذها فى المطبخ أو الجاراج لإنتاج الجزىء للاستخدامات الطبية. غير أنه على الرغم من وجود الوصفات والكيماويات، فإن الجميع يشترون الأسبرين المُصَنَّعَ من الصيدلية المجاورة أو من البقالين أو من الميني ماركت الموجود فى محطات الوقود. والسبب الواضح فى ذلك هو مزيج من التكلفة والجهد والمعرفة وشيءٌ من ضمانات الأمان. وكما جاء فى تقرير للإدارة الأمريكية للأعمال الصغيرة (U.S. Small Business Administration)، "الزبائن تكافئ المؤسسات الراسخة التى توفر منتجات وخدمات موثوق بها ولها سمات معروفة". وهذه الثقة لها ثمنها، وهو أنها "تقلل من قابلية التكيف، لأنها تتحقق عن طريق تخفيض التنوع فى أنشطة المؤسسة التى لولا ذلك لوفرت فرصًا للابتكار، من أجل تحقيق توقعات الزبائن الحاليين"[٢١].

ومن الجلى أن الشركات الموجودة فى سوق العقاقير الطبية لها أفضلية من جراء قوة العلامات التجارية. كما أنها تنزع إلى تكون مستحوذة على كم كبير من النقود السائلة وتسهم بمبالغ طائلة منها فى البحوث الجديدة والتطوير. وعلى النقيض من الأوضاع السائدة فى غالبية الصناعات الناضجة (انظر الفصل ١١)، نجد أن الابتكار

فى الصناعات الدوائية - سواء بإنتاج جزيئات صغيرة الحجم أو أدوية مصنعة بيولوجيًا - تسيطر عليه الشركات الكبيرة فى الوقت الحالى[٢٢]. وتذكر جريدة «الإيكونوميست» أنه على الرغم من إنفاقها ما يربو على ٥٠ مليون دولار سنويًا على البحوث والتطوير، فإن "عمالقة صناعة الدوائيات توالى وضع أيديها على العلم الجديد بشرائها الشركات الصغيرة التى تشتهر بالابتكار، وبالذات فى مجال البيوتك (التكنولوجيا البيولوجية)"[٢٣]. ولكن شركة صغيرة فى مجال البيوتك ليست نفس الشىء مثل شركة صغيرة فى مجال البرمجيات أو أجهزة الحاسب.

عندما تمارس الشركات الدوائية الكبيرة الابتكار بالاستحواذ فإنها تعمد إلى تسوق شركات ذات منتجات واعدة أصبحت بالفعل فى مرحلة التجارب الرسمية لاختبارها من حيث الأمان والكفاءة. ولكى تصل إلى هذه المرحلة من تطوير الأدوية، عادة ما تكون شركات «البيوتك الطفولية» قد وفرت وأنفقت عشرات الملايين من الدولارات - إن لم يكن مئاتها، وقد تكون الشركات ذات المنتجات الموجودة بالفعل فى أسواق البحوث والتشخيص قد حققت بالفعل عائدات هائلة. وتنفق شركات البيوتك التى تشق طريقها إلى الأسواق، تنفق ما يقرب مما تنفقه الشركات الدوائية الكبيرة فى سبيل تطوير منتَج جديد، أى ما بين ٨٠٠ مليون دولار إلى بليون دولار[٢٤]. وليس ذلك بالضبط المناخ الذى يتنفس فيه المستثمرون العاديون. ورغم كم الدولارات التى تنفقها الشركات الدوائية وشركات البيوتك الطفولية المشتراة، فإن إنتاجية دولارات البحوث الدوائية فى انخفاض (انظر الفصل ١١)[٢٥].

ويؤكد جارى بيزانو، وهو أستاذ فى كلية علوم الإدارة بجامعة هارفارد، أن المشكلة بنيوية. وهو يجادل، بعد أن يتساءل، هل يمكن للعلم أن يصبح عملاً تجاريًا؟

> **إن «تشريح» (تركيبة) قطاع البيوتك - والكثير منه مستعار من نماذج تعمل جيدًا فى البرمجيات والحاسبات وأشباه الموصلات وصناعات مشابهة - معيبة فى جوهرها وبذلك لا يمكنها أن تخدم حاجات كلٍّ من العلوم الأساسية والأعمال التجارية.**

وأقصد بكلمة «تشريح» المشاركون المباشرون فى القطاع (المبتدئون فى الأعمال، والشركات الراسخة، والمعامل التى لا تبتغى الربح، والجامعات، والمستثمرون، والزبائن)؛ والتنظيمات المؤسسية التى تربط هؤلاء اللاعبين (الأسواق لرؤوس الأموال، الملكية الفكرية، والمنتجات)؛ والقواعد التى تتحكم فى عمل التنظيمات المؤسسية وتؤثر فيها (القوانين، والشركات الحكومية، وحقوق الملكية الفكرية).

ويؤكد بيزانو أنه، فى ظل الأعباء المالية واللوائحية لتطوير تطبيقات للتعامل مع أنظمة معقدة، فإن الابتكار الناجح يتطلب أسلوباً مغايراً للتعامل. والتعليل الذى يقدمه بيزانو طويل ومفصل، غير أنه يشرح ما يرى أنه أداءٌ ضعيفٌ للتكنولوجيا البيولوجية من جراء «عدم التيقن المتواصل والعميق، المتأصل فى محدودية المعلومات عن الأنظمة البيولوجية البشرية وعملياتها، (التى) تجعل من البحوث والتطوير فى مجال الدوائيات عملاً محفوفاً بأخطار جسيمة»[٢٦]. ومع نزوع الجامعات والأعمال التجارية إلى استخراج براءات لكل ما تقع عليه الأعين (انظر الفصل ١٢)، بجانب تعقيدات البيولوجيا البشرية، فإن تلك النزعة تخلق غابة متشابكة الأغصان من الملكية الفكرية من العسير أن تتوحد فى هدف تطوير الأدوية. ومن بين توصيات بيزانو ثمة تنفيذٌ لدمج رأسى أكبر للبحوث والتطوير والتصنيع وتخفيض عدد شركات البيوتك المستقلة. ومعنى ذلك أن بيزانو يحاج بأن أفضل ما يخدم الابتكار فى تطوير الدواء هو أن يتم على يد شركات أكبر من الموجودة حالياً.

ومما لا ريب فيه أن اللوائح وتعقيدات الأسواق هى قضايا أسوأ فى مجال التكنولوجيا البيولوجية عنها فى أى مجال آخر فى التكنولوجيا. ولكن حجة البحث عن ابتكارات أكبر بالاتجاه إلى المنظمات الأكبر حجماً تبدو معاكسة لتاريخ القرون العديدة الماضية (انظر الفصلين ٥ و١٠). ولا شك فى أن أسباب انخفاض الأموال التى تُنفق

على البحوث متعددة ومعقدة، غير أن التوزيع الذى وضعه وليم بومول للعمالة فى الابتكار، يعطى وجهة نظر لافتة للنظر حول دور المستثمرين الذين ينشدون تطوير تكنولوجيات بيولوجية جديدة (انظر الفصل ١٠).

وفى إطار الرعاية الصحية وتطوير الأدوية للبشر، نجد أن نموذج داوود وجولياث (الضئيل فى مواجهة العملاق) قد يفرض تغيراً فى إجراءات الممارسة عند الشركات الدوائية. فقد تجد الشركات الدوائية الكبيرة أنه من الأفضل لها أن تنفق أموالها المخصصة للبحوث والتطوير فى سبيل التقدم على مسيرة الابتكار، مع إنفاقٍ أقل على كل ابتكارٍ من أعداد أكبر من الابتكارات. وإذا ما تبين فى نهاية المطاف أن المستوى هو الوسيلة الوحيدة للتعامل مع قضايا تطوير علاجات فاعلة وآمنة، فإن على المرء أيضًا أن يتذكر أن أدوية البيوتك تشكل الآن أقل من نصف إجمالى العائدات التى تتكون نتيجة للتكنولوجيات البيولوجية (انظر الفصل ١١). وليس بالضرورة أن يكون واضحًا أن عمالقة البيوتك لهم أفضلية على الصغار فى مجالات خارج نطاق الرعاية الصحية. وتزداد أهمية انتشار الابتكار، والاتصالات الاختراقية، وتبادل البِتات والذرات إذا ما أخذنا فى اعتبارنا بقية الاقتصاد البيولوجى.

«صدمة القديم»

إن الأشياء والتكنولوجيات المستحدثة لا تأتى من فراغ: فذلك أمر لا يحدث. فلا بد أن نستخدم أدوات ومفاهيم موجودة بالفعل فى عملية الاختراعات والابتكارات. فنحن نبنى الجديد من القديم. وبالمثل، وكما يذكر المؤرخ دافيد إدجرتون، علينا أن نحافظ على استمرارية القديم: "إن الرأى القاضى بمركزية الابتكار يضللنا عن طبيعة العلماء والمهندسين. فهذا الرأى يقدمهم لنا، كما يقدمون هم أنفسهم، بوصفهم مبدعين ومصممين وباحثين. غير أن غالبيتهم قد انصب جل اهتماماتهم على المحافظة على الأشياء والإجراءات؛ واستخدام الأشياء، وليس على اختراعها أو تطويرها"[٢٧]. إن

الرأى القائل بأن فهم تطور التكنولوجيا يتطلب النظر إلى الخلف مثلما يتطلب النظر إلى الأمام والاهتمام بالاستخدامات مثل الاهتمام بالابتكارات، هذا الرأى هو جدل محورى يقدمه إدجرتون، من الكلية الإمبراطورية فى لندن، فى كتابه «صدمة القديم». ويذكرنا النظر إلى الخلف بأنه، فى كل الأحوال، ثمة أعداد هائلة من الناس مهتمون بالمحافظة على البنية التحتية المادية والإلكترونية لأنظمتنا الاجتماعية والاقتصادية وحمايتها من الانهيار.

وحتى أولئك العلماء والمهندسين الذين يشاركون فى الاختراعات والتطوير سوف يدركون أن غالبية وقتهم يقضونها فى المحافظة على التجهيزات التى يبنونها ويشترونها ويستخدمونها. وليس من سبيل لإدراك تكلفة المحافظة سوى بالنظر إلى الخلف بمرور الوقت. وسواء كانت التكلفة فى شراء سلع استهلاكية بعينها، أم تجهيزات تجارية، أو أنظمة تصنيع، فإن الأمر يسفر فى النهاية عن أن تكلفة المحافظة من النادر أن تتضمنها تقديرات الناتج المحلى الإجمالى.

تعتبر كندا من الدول القليلة التى تحتفظ بإحصائيات محددة عن الصيانة، والتى يصل مقدارها إلى ٦ بالمائة كاملة من الناتج المحلى الكندى فى السنوات ١٩٦١–١٩٩٣[٢٨]. ويستشهد إدجرتون بعديد من الأمثلة المنفصلة عن تلك البيانات، حيث تتراوح تكلفة الصيانة من ٥٠ بالمائة إلى ما يزيد على ١٠٠ بالمائة من حجم الاستثمارات الأصلية فى الطرق والمبانى ومعدات التصنيع والتنجيم. وفى الولايات المتحدة فى ثمانينيات القرن الماضى وصلت تجديدات الأبنية وإصلاحاتها إلى ٥ بالمائة من الناتج المحلى الإجمالى، أى ضعف ونصف ضعف ما أُنفِق على البناء الجديد[٢٩].

تُبنى جميع المبانى الجديدة بأقلمة وتعديل عمليات البناء القديمة، ونتقدم إلى الأمام تدريجيًا مع استيعابنا لتطبيقات جديدة لتقنياتٍ موجودة. وبهذا، ولكى نسرد حكايات تتناول تغيرات التكنولوجيا، فعلينا أن نعتبر الحاضر هو نقطة المنتصف وليست البداية.

ولهذا لو نظرنا إلى الخلف فسوف نتزود ببعضٍ من الإدراك عن تركيبة مستقبل الاقتصاد القائم على البِنات والذرات. ومن المرجح استحالة تقدير كم ستضيف صيانة الأنظمة البيولوجية إلى حسابات الناتج المحلى العام حول العالم. غير أن الأمر المهم هو أن الصيانة «غير - المسجلة - فى - الدفاتر» سوف تستمر بغض النظر، وربما بسبب، تعقيدات المعدات المستخدمة فى تخليق الأنظمة البيولوجية المعقدة ومتابعتها.

ونتذكر من الفصول السادس إلى التاسع أن كلاً من الخدمات المعيارية وذروة التطور فى الابتكار موجودة بالفعل فى أيدى تلاميذ المدارس الثانوية والكليات الجامعية وعاملين لا يتمتعون بتدريب تعليمى رسمى أو بالكاد بنزر يسير منه، ويعود الفضل فى ذلك إلى (١) الأتمتة، و(٢) توفر بروتوكولات معملية مبسطة، و(٣) توفر قطع بيولوجية معيارية. ولنفترض عالمًا ممتلئًا بثمار الهندسة البيولوجية الناضجة، وحيث يكون الجزء من الناتج المحلى الإجمالى المخصص فى الاقتصاديات التى نمت للكائنات المعدلة جينيًا أكبر بكثير من الاثنين بالمائة الحالية: فسوف يكون ثمة عدد هائل من الناس منشغلون بصيانة وإصلاح الأنظمة ذات الصلة. وطبيعة الأشياء تفرض أن يكون هؤلاء الناس قد تلقوا التدريب اللازم لبناء تلك الأنظمة وصيانتها وتشغيلها، وأن تلك الأنشطة سوف تكون ذات قيمة اقتصادية كبيرة، حتى ولو لم يتم حسابها بطريقة مباشرة. والشيء الأهم، بصرف النظر عن الكيفية والمكان الذى تلقوا فيه هذا التدريب، هو أن هؤلاء العاملين من المرجح أنهم سوف يستعملون مهاراتهم حيث يتقاضون مرتبات، مثلما لاحظ إدجرتون: "الصيانة والإصلاح هى أكثر أنواع الخبرات التقنية شيوعًا ... وجانب كبير (منه) يتم خارج نطاق الاقتصاد الرسمى"[٣٠]. ومن المستحيل متابعة أنشطة الصيانة فى التكنولوجيا البيولوجية لأننا لا نحتفظ بسجلات لها فى أى قطاع آخر من الاقتصاد: "على الرغم من أهميتها القصوى فى علاقاتنا بالأشياء فإن الصيانة والإصلاح هى أمور لا نحب أن نفكر فيها. وهى مملة وتسبب الغيظ وحافلة بالشكوك، وهى من مصادر المضايقات التى تحيط بالأشياء. ويُترك الأمر على الهامش وأحيانًا يُترك فى أيدى أناس هامشيين"[٣١].

وفى كل مجال تقنى، فى كل بلد نامٍ، يحدث حتمًا أن سلعًا تعمل بكفاءة ممتازة يتم استبدالها بسلع أحدث، وتباع السلع القديمة بأسعار مخفضة فى المحل المجاور أو فى الجاراج أو بعد تصديرها إلى دول أقل نموًا. وينطبق ذلك على الحاسبات والسيارات والسفن والطائرات والهواتف المحمولة، مع ظهور قطاعات للصيانة وإعادة التصنيع فى الهند وأفريقيا وأمريكا الجنوبية وآسيا لدعم تلك السلع فى انتشارها حول العالم(٣٢). وقريبًا سوف تنضم إمكانات تكنولوجية أكبر إلى البنية التحتية للخدمات الموجودة عن طريق الانتشار النهائى لـ «معامل فاب» زهيدة التكاليف والطابعات الثلاثية الأبعاد وكل التجهيزات اللازمة لبناء أنظمة بيولوجية تخليقية. وبغض النظر عن الشكل النهائى لاقتصادٍ مبنى على الابتكار المنتشر وشيوع الاتصالات وتبادل البِتات والذرات، فسوف يستمر الاقتصاد فى اعتماده على الصيانة والإصلاح والخبرات التقنية واسعة الانتشار على الأقل مثلما يعتمد عليها الاقتصاد الحالى. وبدون إدراك وفهم لما حدث من قبل لن نستطيع أن نستوعب ما سيحدث فى المستقبل.

غير أنه من المرجح أن ثمة اختلافات موضوعية بين اقتصاد اليوم والاقتصاد النهائى القائم على البِتات والذرات. فالكائنات المنتجة للوقود والمواد أو البُنَى تحتاج رعاية – مما يوفر صنفًا جديدًا من الوظائف – بينما يتم الإنتاج نفسه على المستوى الجزيئى، بعيدًا بصورة عامة عن أعين العاملين من البشر. والمفيد فى الموضوع أنه مع تحول الإنتاج من جراثيم مستنبتة إلى كائنات متعددة الخلايا ثم إلى نباتات تنمو فى حقول مكشوفة، فإن تركيبة الإنتاج تبدو أقرب فأقرب إلى الطبيعة ذاتها.

وبخلاف التجهيزات التى تسمح بإمكانات تخليق الدنا والتلاعب به وسَلسَلَته، ليست ثمة بنية تحتية جوهرية جديدة لتنفيذ تصنيع البيولوجيا. وعِوضًا عن ذلك، علينا أن نتعلم أن نستخدم ما هو موجود بالفعل. وفى عالم المستقبل تشكل البيولوجيا بكاملها كل البنية التحتية اللازمة للتصنيع، وتشكل الأنظمة البيئية بكاملها حدود الاقتصاد، الذى يجب، بطريقة ما، أن يدار على مستوى عالمى. وعلينا أن نتعلم

استغلال القديم. فالغالبية الساحقة من أى «كائنات مخلقة» التى سوف تُصنع فى العقد القادم على الأقل، ستكون مكونة فى المقام الأول من تكنولوجيا قديمة موروثة من بلايين السنين من التطور.

إن "المصنع" - الذى يتلقى التعليمات على صورة دنا ويمخض المواد والكيماويات وغير ذلك من كائنات فاعلة - هو فى الزمن الراهن أكثر تقدمًا بالفعل من قدراتنا الحالية على فهمه أو استخدامه بما يحقق أهدافنا. وسوف يمر وقت طويل قبل أن تصل جهودنا فى إعادة برمجة النباتات إلى مستوى يتناسب مع الإمكانات الحالية للمصنع. ومع الجهود الجارية لتوسيع نطاق الاستفادة من دارات السيطرة الجينية ونشر كلٍّ من الشفرة الجينية وتنوع الأحماض الأمينية المستخدمة فى تنفيذ تصميمات البروتينات، نجد أن المصنع تزداد بالفعل تعقيداته وقدراته. غير أننا ما زلنا لا نفهم إلا النزر اليسير من النظام القديم - وهو النظام البيئى الحالى - الذى سوف تعيش فيه الكائنات الجديدة. وعلى الرغم من عدم اليقين هذا، سوف تشكل الأنظمة البيولوجية المعدلة قدرات تصنيعية أقوى، مع تأثيرات أكبر على الاقتصاد. وبناء على ذلك، ربما يكون لانتشار الابتكارات البيولوجية تأثيرات أشد بكثير من تأثير البرمجيات مفتوحة المصدر والابتكارات المفتوحة على باقى الاقتصاد العالمى.

الإبحار عبر اختلال التوازن

«التوازن» كلمة لها معان كثيرة. فهى تتحدث عن توازن القوى، والتدفق إلى الخارج يعادل التدفق إلى الداخل، والعرض يساوى الطلب، والسعر المتزايد يعادل السعر المتناقص، وهى الركود والتوقف، وهى المحافظة على الاتزان. وفى أى من تلك المعانى لا نجد أن التكنولوجيا البيولوجية، ولا أسواقها النامية أو الاقتصاد الذى يرعاها، فى حالة توازن.

تزداد تعقيدات التقنيات البيولوجية بسرعة رهيبة. وتتكاثر المهارات عالميًا، مضيفة عمالة ماهرة إضافية. وبصورة مستديمة هناك طلب متزايد على المزيد من الطعام، ورعاية صحية أفضل، ووقود يستطيع السوق أن يوفره. وبهذا فنحن باختيارنا كمستهلكين نلفت الانتباه إلى الطريق تجاه تزايد الطلب على مزيد من الابتكار.

من أين ستأتى التكنولوجيات البيولوجية الجديدة؟ إذا كانت نظرية وليم بومول عن الصراع بين داوود وجولياث (العملاق والضئيل) والخاصة بتقاسم العمالة فى الابتكار، إن كانت هذه النظرية صحيحة فيما يتعلق بالتكنولوجيا البيولوجية، فإن البنية الحالية للاقتصاد البيولوجي هى أبعد ما تكون عن التوازن، فالشركات الكبيرة تهيمن عليها. وإذا ما استندنا إلى تحليلاته التاريخية والاقتصادية، ومع انخفاض التكلفة وانتشار المهارات، فإن علينا أن نتوقع ابتكارات هائلة من المستثمرين والشركات الصغيرة. فإن كان التكاثر الناتج للتكنولوجيا البيولوجية يسمح بانتشار التصنيع، فإن بنية قطاعات بأكملها من الاقتصاد يتوجب عليها أن تجد توازنًا جديدًا.

من الجلى أن تراكم معارفنا عن البيولوجيا وقدرتنا على التعامل معها تسير بخطى مذهلة. ولقد كُتِب هذا الكتاب على مدى سنوات عديدة، وخلال الأشهر القليلة الأخيرة فى الكتابة ترددت الأنباء عن:

- تخليق أول جينوم جرثومى من الصفر.
- أول بيانات تتناول تكلفة الطاقة والكربون لاستخدامٍ واسع النطاق للوقود الحيوى.
- أول إعادة برمجة ثابتة للخلايا النباتية باستخدام كروموسومات اصطناعية.
- أول خلايا جذعية جنينية مستمدة من نقل النوايات.
- أول خلايا جذعية متعددة التمايز مستمدة من إعادة برمجة خلايا جسمية.
- أول استخدام لتلك الخلايا فى علاج الأمراض فى نموذج حيوانى.

- أول استخدام لخلايا جذعية ذاتية لإنتاج أعضاء بشرية لاستخدامها فى نقل الأعضاء.

ما الذى ينبغى علينا عمله (وما الذى لا ينبغى علينا عمله)

مع مناقشتنا لكيفية تحسين الأمن والسلامة فى الاقتصاد البيولوجى القادم، نجد من الأوفق أن نلتفت إلى خبرات المحترفين الذين يحاولون تحسين الأمن والسلامة للبنية التحتية المزدهرة للمعلومات. ونستعين بمقتطفات من محادثة قصيرة بين خبيرى أمن الحاسبات الآلية بروس شنايدر وماركوس رانوم التى تعطينا بعض الملامح:

بروس شنايدر: على مر التاريخ ومستقبلاً، أجد أن الثابت الوحيد هو الطبيعة البشرية. فلم تُخترع جريمة جديدة لآلاف السنين. فالاحتيال والسرقة وانتحال الشخصية والتزوير كلها مشاكل خالدة وُجدت منذ بداية المجتمعات. وخلال السنوات العشر الماضية انتقلت تلك الجرائم إلى مجال الفضاء الإلكترونى، وفى السنوات العشر القادمة سوف تنتقل إلى أية منصة سوف نستخدمها فى الحاسبات والاتصالات والتجارة.

ستكون طبيعة الهجمات مختلفة سواء فى الأهداف أو التكتيكات أو النتائج. والأمن هو عبارة عن مقايضة وسباق تسلح، وهو توازن بين المهاجم والمدافع، وتغيرات التكنولوجيا تفسد هذا التوازن. وقد تقوم التكنولوجيا بتكتيك معين أشد فاعلية، أو تكنولوجيا معينة خاصة بالأمن تكون أرخص وأكثر انتشارًا فى وجودها. أو ربما يصبح أحد التطبيقات الجديدة هدفًا مفضلاً.

ولست أجد أن أى شىء بحلول ٢٠١٧ سيغير ذلك تغييرًا جوهريًا.

ماركوس رانوم: أعتقد أن الاحتمالات تتزايد فى أننا سوف نعانى فشلاً كارثيًا فى أنظمة بنية تحتية حاسمة بحلول ٢٠١٧، وربما لن يكون

الإرهابيون هم المتسببون فى ذلك ... وتشير كل الدلائل إلى نظام أشد تعقيداً وفهمنا له أقل وأكثر ترابطاً. من يحتاج إلى أعداء مع وجود بنية تحتية بهذا الشكل؟

أنت قلق بسبب أن المجرمين سوف يستمرون فى اختراق الفضاء الإلكترونى، وأنا قلق لأن التعقيد والتصميم الردىء والإدارة السيئة سوف تكون فى انتظارهم[٣٢].

وقد تنشأ تهديدات الأمن والسلامة من التصميم الردىء أو التنفيذ السيئ. وفى حين سوف تسعى الحكومات وغيرها من المؤسسات إلى فرض المراقبة والسيطرة، فإن الأفراد ومؤسسات أخرى سيقاومون ذلك، سواء من قبيل الإيديولوجيات أو بدافع التربح أو لمجرد متعة عمل شىء جديد تمام الجدة. ولكى تزيد الأمور تعقيداً، سوف توالى الظهور فى عالمنا باستمرار أدوات جديدة وقدرات جديدة ونقاط ضعف جديدة.

كيف نُعَرِّفُ الأمن والسلامة البيولوجيين فى هذا العالم؟ إن مفتاح هذا المسعى هو التعليم. ولا نستطيع أن نتوقع من الحكومات أو المؤسسات الاحترافية أن تكون هى المصدر الوحيد للسلامة، فلا بد أن تكون أيضاً فى أيدى الأفراد. ونمو إدراك للفوائد أو الأضرار المحتملة هو مُكَوِّنٌ حاسم من مكونات إدراك الجماهير ومشاركتها فى كلٍّ من الابتكار والسياسة، وخيارات السياسات.

وفى إطار الاتصالات المتفشية، والابتكار المنتشر، وتبادل البِتات والذرات، يعتمد أمننا المادى والاقتصادى على الفهم السريع والدقيق للعالم. وهذه هى أقوى حجة للسعى إلى تطوير تكنولوجيا شفافة وتعظيم تدفق المعلومات. ويتوجب علينا أن نركز انتباهنا فى ثلاثة تحديات:

١- *علينا أن نقاوم الاندفاع تجاه تحجيم البحوث وتدفق المعلومات.* فلن يساعد الجهل أحداً في حالة ظهور تهديدات، ومع أخذ سرعة وانتشار التقنيات البيولوجية في الاعتبار سوف تتزايد احتمالات التهديدات في السنوات القادمة. ومن بين أشد الأخطار التي تواجهنا أن الأعمال ذات الاحتمالات الضارة سوف تمضي قُدُمًا بينما نجلس نحن مكتوفي الأيدي ودون أن نحرك ساكنًا. والعلم يحتاج إلى الاتصالات المفتوحة، وسياسة الجهل الاختياري لا تفيد إلا في ضمان انعدام الأمن الاقتصادي والمادي. وإذا لم نقم بأنفسنا بتوسيع حدود ما هو معلوم عن الكيفية التي تعمل بها الجراثيم المُمْرِضة أو وسائل معالجتها، فنحن في موقف سيئ للغاية. ونقولها ببساطة، إنه سوف يكون من الأسهل أن نتتبع ما تأتي به الرياح إن لم نضع رؤوسنا في الرمال.

٢- *إن أفضل وسيلة لكي نبقى مطلعين على أنشطة الهواة والمحترفين هي أن ننشئ شبكات مفتوحة.* وعلينا أن نفكر بجدية في أمر رقابة حكومية على تلك الشبكات. والمجتمع الناشئ على المصادر المفتوحة ينتعش على ثبات الاتصالات ووفرة النصائح المجانية. والاتصالات والتعاون هي من الممارسات الشائعة بين مخترقي البيولوجيا المحترفين، وهي أمور واضحة بالفعل على الشبكة العنكبوتية بين مخترقي البيولوجيا من الهواة[٣٤]. ويمثل ذلك فرصة سانحة للبقاء مطلعين على الابتكارات في صورتها المنتشرة. وأي شخص يحاول الإتيان بشيء جديد سوف يحتاج إلى النصيحة من شيوخ المهنة، وقد يحتاج الأمر منه أن يعلن عن نتائجه أو جانبٍ منها. وكما يتضح من النقد الجاهز من الأوغاد على منتديات النت التي يتردد عليها مطورو البرمجيات، لا يخشى الناس من التصريح بمكنوناتهم عندما يحسون أن عمل شخص بعينه أو مجموعة من الأشخاص أقل من المستوى أو يتهدد مصالح الجماهير. وبذلك يكون أفضل دفاع محتمل لنا ضد التهديدات البيولوجية هو أن ننشئ شبكات مفتوحة من الباحثين من جميع المستويات ونحافظ عليها، وبهذا نضاعف من أعداد العيون والآذان التي تتابع ما يحدث في العالم.

٣- *لما كان احتشاد الذكاء البشرى قد تأكد، ويا للأسف، عدم ملاءمته للمهمة الحالية، فعلينا أن نطور تقنية تتيح رصداً بيئياً واسع النطاق.* وأفضل وسيلة لاكتشاف التهديدات البيولوجية هى استخدام البيولوجيا ذاتها، على صورة كائنات معدلة جينياً. وعلى النقيض من إنتاج الأسلحة الكيماوية وانتشارها أو المواد الانشطارية، والتى يمكن أحياناً متابعتها بتقنيات استشعار عن بعد على شاكلة المراقبة فى الموقع بالفيديو، وكذلك بالاستطلاع بالطائرات والأقمار الصناعية، فإن الدلائل الأولية عن الأخطار البيولوجية قد لا تزيد على خلايا أو جزيئات قليلة. وهذه الكمية الضئيلة قد تكون بالفعل جرعة قاتلة ومن الصعب اكتشافها باستخدام أجهزة تعتمد فقط على الكيمياء أو الفيزياء. وكبديل، يمكن استخدام «حشرات المراقبة» - وهى كائنات مهندَسة - يتم نشرها فى البيئة، وتستطيع أن تحول كميات ضئيلة من الخلايا أو الجزيئات إلى إشارات قابلة للقياس بواسطة استشعار عن بعد. ويمكن تعديل الكائنات بحيث تتكاثر عند وجود إشارات معينة، أو تغير ما تدربت عليه أو سلوكياتها كقطيع، أو تغير من مظهرها الفيزيائى. وتشمل «منصات الكواشف» مجالات الجراثيم والحشرات والنباتات والحيوانات. وتم بالفعل إنتاج السمكة المخططة عبر الجينية (سمكة الزرد) والديدان الخيطية وعشب الخردل من فصيلة «أرابيدوبسيس ثاليانا: Arabidopsis thaliana»، كلها تم إنتاجها لهذا الغرض[٢٤]. والكاشف البيولوجى للزرنيخ الذى طوره فريق إدنبره فى مسابقة أى جِم لسنة ٢٠٠٦ (انظر الفصل السابع) هو إشارة واضحة أن ذلك التوجه قد يفى بقدرات ثمة احتياج لها. والكائنات المهندَسة إما أن يتم إدماجها ككاشفٍ فى جهاز مغلق، أو يتم إطلاقها فى البيئة البرية؛ والاختيار الأخير قد يواجه التقصى مثله فى ذلك مثل أى محصول أو حيوان معدل جينياً.

لن يكون أىٌ من الأهداف المقترحة أعلاه سهل التحقيق. ولقد أُنفِقت مبالغ طائلة على مدى العقود الخمسة الماضية فى سبيل فهم الأنظمة البيولوجية على المستوى الجزيئى، وغالبيتها تحت مسمى مكافحة الأمراض المعدية. وعلى الرغم من أن تلك الجهود

قد أسفرت عن حدوث تقدم مثير فى تشخيص وعلاج الأمراض المعدية، فإنه يتوجب علينا الآن أن نضاعف من جهودنا.

على مدى السنوات العديدة الماضية تنادت أصوات متنوعة بالدعوة إلى 'مشروع مانهاتن جديد' لتطوير الإجراءات المضادة ضد الأخطار البيولوجية الطبيعية منها والاصطناعية[٣٦]. وكما ذكرت فى الفصل التاسع، نحن بالقطع نحتاج إلى تقنيات جديدة لمواجهة الجراثيم المُمْرِضة سواء منها الطبيعية أو الاصطناعية، ولكن مشروع مانهاتن بلا ريب هو نموذج خاطئ لجهود ترمى إلى زيادة الأمن البيولوجى.

فلقد كانت الجهود الحكومية السابقة من أجل تطوير سريع للتكنولوجيا، على شاكلة مشروعى مانهاتن وأبوللو، جهوداً مغلقة فى غالبيتها، لأسباب كانت وجيهة وقتئذ. غير أننا نعيش فى حقبة مغايرة وعلينا أن نفكر فى مجهودات مفتوحة تستفيد من البحوث وشبكات التطوير الموجودة أصلاً. وقد تتمخض هذه الإستراتيجية عن مزايا أمنية واقتصادية أقوى وأكثر استدامة. ونلاحظ أيضًا أنه على الرغم من أن مشروعى مانهاتن وأبوللو كان كلاهما مغلقًا بالسرية وتحت سيطرة مركزية، فإنهما كانا مختلفين تمام الاختلاف فى بنيتهما. فقد تم إنجاز مشروع أبوللو تحت أنظار الجمهور، وفشله موثق بالدخان والأنقاض فى السماء. وعلى النقيض من ذلك، تم تنفيذ مشروع مانهاتن خلف الأسلاك الشائكة وكان ممعنًا فى سريته بحيث لم يكن يدرى بوجوده سوى قلة من الأشخاص والعسكريين فى حكومة الولايات المتحدة. ولا يمكن أن يكون مشروع سرى النموذج المثالى لبحوث تهدف بكل وضوح إلى فهم كيفية تغيير أنظمة بيولوجية. ففوق كل شيء، علينا أن نصر على أن يتم العمل فى النور، ويكون متاحًا لكل من يود تفحصه.

وبالإضافة إلى توفير قدرات فطرية لحشد الذكاء، تستطيع الشبكات المفتوحة والمنتشرة للباحثين والمبتكرين أن توفر قوة عاملة مرنة وقوية لتطوير التكنولوجيا. ومن الممكن استخدام هذه الموارد فى استجابة سريعة للأخطار التى تظهر، وتطوير استجابة

ربما تشمل مركبات وكائنات مستحدثة. وقد ظهرت بوادر نظام استجابة أثناء الانتشار الحديث لوباء سارس، غير أن المزيد لا يزال مطلوباً[٣٧].

وقد يعتبر البعض أن عدة عقود من الخبرات فى البرمجيات المفتوحة المصدر غير كافية كنموذج تنظيمى يعمل كأساس لاستجابةٍ تجاه تهديدات بيولوجية. وفى حقيقة الأمر، قد يكون أفضل نموذج هو ما نجده فى تاريخ البيولوجيا بوصفها فرعًا أكاديميًا من فروع المعرفة. ولكى نقترب بجوهر مشروع مثل مشروع أبوللو من العمل المنوط بأيدينا، فعلينا تقوية وتكييف تقاليد الخطاب الحديث المفتوح بين الأكاديميين وتشاركهم فى الكواشف الكيميائية والمخزون البيولوجى. وعلينا أن نكافح بكل قوة اكتناز النتائج والمواد والاحتفاظ بها، وفى الحق لا بد من توفر المشاركة فى المعلومات والمخزون. وقد يكون من الحكمة كتابة تلك المبادئ التوجيهية فى وثائق قانونية، ولو لمجرد إعطاء مزيد من الثقل لضغوط شيوخ المهنة. ومما لا ريب فيه أن المبادئ التوجيهية القانونية الموضوعة بهذه الطريقة سوف يُنظَرُ إليها باعتبارها ضربًا من التنظيمات الذاتية، غير أن ذلك سيكون فى إطار الأسواق المفتوحة. وقد تنفع حرية التوصل المفتوحة للمعلومات والتكنولوجيا فى تثبيط الأسواق السوداء التى تظهر تحت مظلة التنظيمات التى تأتى من أعلى. ويمكن صياغة تلك الاتفاقات بحيث تتيح المشاركة الطوعية حرية التوصل الفورى للمعلومات أو الكواشف الكيميائية والتى بدون ذلك يصعب الحصول عليها، مما يسهم فى تشجيع المشاركة بدون حظر أنشطة من يفضلون البقاء مستقلين. وبذلك يمكن تعزيز القدرة على المنافسة فى الأسواق من خلال التعاون وحرية التوصل إلى المعلومات، فى الوقت الذى قد يصبح فيه التطور العلمى والتكنولوجى خارج هذا المجتمع أقل كفاءة وبالتالى مثبِّطًا.

قد تقوم المؤسسات الجديدة أو الموجودة بالفعل باستخدام هذه الاتفاقات فى التنسيق. وهناك بنية من هذا القبيل موجودة بالفعل فى مجتمع البيولوجيا، على شاكلة «الجمعية الأمريكية للسرطان» و«مؤسسة ولكوم» و«مؤسسة بيل ومليندا جيتس» وكثير

غيرها، تمول من أجل المؤتمرات والدوريات العلمية والبنية التحتية الفيزيائية، واتجاهات معينة للبحوث.

وأخيرًا، إن أفضل حجة لتشجيع تطور البيولوجيا المفتوحة فى أوساط الهواة والأكاديميين والسياقات الصناعية هى أن المجتمع الناتج سيكون أقدر على اكتشاف مواطن الخطأ والتصدى لها. وتتضح أهمية هذا الهدف فى الاستثمارات المزدهرة فى التلاعب بالحياة على المستوى الجينى. وربما تكون أهم خطوة نخطوها فى سبيل تحسين أمننا فى العقود القادمة هى إنشاء شبكات دولية لتنسيق البيولوجيا المفتوحة.

إن تاريخ أى تكنولوجيا بعينها هو تاريخ معقد بصورة ملحوظة. والأشخاص يأتون ويذهبون، وأحيانًا يلعبون أدوارًا مصيرية سواء بواسطة اختراعاتهم أو عن طريق دورهم فى الابتكارات التجارية.

وربما تستغرق التكنولوجيات عدة عقود لكى تخترق اقتصادًا ما، وعلى وجه الخصوص فى إطار استثمارات موجودة أصلاً فى بدائل أو فى مقاومة ثقافية. وقد لا تختلف فى ذلك التكنولوجيا البيولوجية، حتى تحت ظروف تكون فيها العملية البيولوجية فاعلة أو زهيدة التكاليف.

إن مزايا استكشاف هذه الحدود واعدة بصورة استثنائية وكذلك، حتى بعد ثلاثة عقود من تطوير تكنولوجيات إعادة تجميع الدنا (recombinant DNA technologies)، هى فى مجملها مراوغة بصورة محبطة. غير أن العمل سوف يستمر. فالمزايا الاحتمالية من النواحى العلمية والسياسية والاقتصادية أشد جاذبية من أن يقاومها البشر. والأفراد والحكومات على حد سواء منبهرون باحتمالات تحسن المحاصيل وزيادة إنتاج اللحوم ووفرة الوقود الحيوى وتحسن صحة البشر من خلال لقاحات وأنسجة تعويضية جديدة.

ولقد روى هذا الكتاب قصة عن تعلم بناء أنظمة بيولوجية قابلة للتنبؤ بسلوكياتها. ومثلما أدرك مويار منذ ما يزيد على قرن أن البشر لن يرتفعوا على سطح الأرض إلا بتعلم الطيران، وليس بمجرد إلصاق محرك بقطع على شكل أجنحة على أمل أن يحدث الطيران، وهذا هو حالنا اليوم ونحن نشرع فى كيفية توفيق البِنات والقطع البيولوجية معًا فى سبيل صنع أشياء تؤدى عملاً. وما لم يستطع مويار والأخوان رايت وأوكتاف شانوت وكل الآخرين من الرواد الأوائل التنبؤ به هو تأثير عملهم على مجتمعنا وحضارتنا بوجه عام. وعلى نفس الشاكلة، لم يتمكن هؤلاء المبتكرون ولا مواطنو أى بلد وحيد من أن يفرضوا سيطرة حقيقية لزمن طويل على تطور التكنولوجيا.

على مدى العقود المبكرة للقرن العشرين، دفعت الحكومات والمؤسسات العسكرية والمنظمات الطيران كلٌ فى اتجاه يناسب احتياجاتها. والشيء الذى بدأ كتحديات فكرية سرعان ما تطور من خلال مزايا عسكرية تكتيكية إلى ثورة اقتصادية لا تستطيع الاقتصاديات الحديثة أن تعيش بدونها. وفى وقت من الأوقات سار التطور فى صناعة الطيران بأسرع منه فى صناعات أخرى، ولكن النقل الجوى بات يشكل الآن حلقة حاسمة فى اقتصاديات الدول التى يسكن فيها أغلب سكان العالم. أما كون ذلك الوضع يمثل سياسة مثالية، أو توزيعًا عاقلاً للموارد الاقتصادية فهو أمر خارج عن الموضوع. وها نحن هنا؛ وهذا هو العالم الذى نعيش فيه. وما سوف تتمخض عنه الأيام ينبع من اليوم.

كما تناول هذا الكتاب أيضًا الأمثلة التاريخية التى تطرح نماذج واضحة للوصول بالابتكارات التكنولوجية إلى أقصى حدودها. والحجج التى يتعين علينا تحاشيها أثناء مضاعفة الابتكار، إما من خلال الحصول المنظم على التكنولوجيا أو من خلال اعتصار التمويل الحكومى والصناعى، سوف تتركنا سيئى الاستعداد للتعامل حتى مع الأخطار الطبيعية، ناهيك عن الظهور الذى لا مناص منه للأخطار الاصطناعية. وحتى فى مواجهة أية محاولة لتنظيم الحصول على التكنولوجيا، ومع انخفاض التكلفة وانتشار المهارات، فإن تبنى التكنولوجيات البيولوجية سوف يكون منتشراً.

إن الثورة الأكثر تحرراً والخاصة بالابتكارات المنتشرة وشيوع الاتصالات وتبادل البِتات والذرات تشير إلى أن محاولات تنظيم الحصول على المعلومات مآلها الفشل فى أغلب الظن. وتكمن الأهمية المباشرة لهذه الثورة للتكنولوجيات البيولوجية فى أننا حتى لو حاولنا تنظيم القطع من أجل مُخَلِّقات الدنا أو أية تجهيزات أخرى، فإن التجهيزات لصناعة سريعة للنماذج الأولية والطابعات الثلاثية الأبعاد يمكن استخدامها فى إعادة إنتاج تلك المكونات. ويضاف إلى ذلك أن الحظر عادة ما يكون قصير العمر ومنعدم الكفاءة. وهؤلاء الذين ينادون بمحاولات لتحسين الأمن والسلامة من خلال التنظيم والتقييد عليهم أن يأتوا بأمثلة ناجحة لتلك السياسات من داخل اقتصادات السوق. والتنظيمات التصادمية سوف تؤخر تطوير صناعة مزدهرة يدفعها رجال الأعمال ويساندونها، وبالتالى سيتولد منها عالم أقل أمناً.

إن مجتمعنا قد بدأ لتوه يتصارع مع كل القضايا الاجتماعية والتكنولوجيى التى تنشأ من جراء تحولٍ جوهرى فى الاقتصاد. ويحمل التاريخ بين ثناياه دروساً عديدة إلى كل من يشارك منا فى تخليق أدوات وكائنات جديدة وفى محاولة الإدماج الآمن لتلك التقنيات فى نظامنا الاجتماعى الاقتصادى المعقد. وبكل أسف يفشل التاريخ أيضًا فى الإتيان بأمثلة لأى أنظمة تكنولوجية أخرى على نفس الدرجة من قوة الهندسة المنطقية للبيولوجيا، ولا نملك إلا دليلاً ضئيلاً ثميناً يختص بالكيفية التى سوف يتغير بها نظامنا الاجتماعى الاقتصادى فى السنوات القادمة. ولا نملك إلا محاولة التقليل من أخطائنا ونسارع بتصحيح تلك الأخطاء التى نقترفها نحن وآخرون. وفى غضون بضع سنوات قد يزداد وضوح المسار بعد أن يجرب الرواد مسارات شتى، تؤدى فى جوهرها مهمة بيانات تجاريبية مبكرة تزيد من تحديد شكل مجتمعنا واقتصادنا.

سوف ينبنى الاقتصاد البيولوجى القادم على تقنيات هى فى جوهرها أقل تكلفة وأوسع انتشاراً من تلك التى صاغت مسار القرن العشرين. وسوف تحدد خياراتنا فى

كيفية تطوير التكنولوجيات البيولوجية سرعة الابتكار ومدى فاعليته كسلعة جماهيرية.
ومثلما هى الحال فى باقى العالم الطبيعى والعالم الذى صنعه الإنسان، سيكون تطوير هذا النظام عملاً بشريا خالصاً.

خـــاتمــــة

كان أشق أمر فى كتابة هذا الكتاب هو متابعة سرعة تغيرات التكنولوجيا البيولوجية. وكان الأمر أشبه ما يكون بمحاولة المرء أن يحفظ توازنه على رمال متحركة أثناء حدوث زلزال بينما هناك إعصار يضرب الشاطئ.

بدأت قصة الأنظمة البيولوجية التخليقية بمايكل إلوفيتز وتيم جاردنر ودرو إندى فى الفصل الرابع، ثم تناولت مسابقة آى جِم وبعض الأشخاص الآخرين أثناء المسيرة، غير أنى لم أتمكن من مناقشة أرتال من الأمثلة المنشورة الممتازة عن أنظمة بيولوجية تخليقية تتبدى فيها سلوكيات قابلة للتنبؤ. ولقد حدث هذا الإغفال لمجرد أن كل شخص فى هذا المجال يجرى بسرعة تستحيل مجاراتها. وكان الطلبة، كالمعتاد، يقودون المسيرة.

فى مسابقة آى جِم لسنة ٢٠٠٨، قدمت الفرق مشاريع شتى تتناول كل شيء من إنتاج الكهرباء من الجراثيم، إلى بناء أدوات هندسة جديدة، إلى لقاحات مخلقة [١]، وهذه الجراثيم، التى طورها الفريق من سلوفينيا الذى فاز بالجائزة الكبرى - وهو مكون من طلبة من مرحلة ما قبل التخرج - تم تخليقها ثم تجربتها على فئران خلال بضعة أشهر، مما أثبت مزايا كلٍّ من التخليق بوصفه تكنولوجيا سريعة الاستجابة (انظر الفصل التاسع) وكذلك الانتشار العريض للتكنولوجيات البيولوجية حول العالم.

ولعلنا سوف نحتاج سريعًا إلى توزيع اللقاحات المخلقة. والجرثومة الممرضة التى فاجأتنا عام ٢٠٠٩ هى الإنفلونزا حقًا، غير أنها لم تكن السلالة التى كان الجميع

يتابعونها، ولم تظهر فى المكان الذى كانت كل العيون تراقبه. ففى سنة ٢٠٠٩ اكتُشِف فيروس «إتش١ إن١» (H1N1) لأول مرة فى المكسيك وسرعان ما انتشر فى العالم أجمع. وحين يمكن لهذه السلالة أن تتسبب فى أعراض مرضية خطيرة والوفاة، إلا أنه فى الوقت الحالى ليس بدرجة السوء التى كنا نتخوف منها فى البداية. ولقد بدأ بالفعل إنتاج اللقاح، ولكننا بكل وضوح نجد أنفسنا فى الوضع نفسه الذى وصفناه فى الفصل التاسع؛ وهو أن تطور الفيروسات قد يكون أسرع من التكنولوجيا الحالية لإنتاج اللقاح. واللقاحات التخليقية، بما فيها لقاحات الدنا، هى بالفعل موضع مناقشة كوسيلة للهروب من هذا الفخ.

كما استُخدِمَ تخليق الجينات أيضًا فى إعادة تخليق جرثومة مُمْرِضة أخرى من الصفر. ففى أخريات ٢٠٠٨، وصف رالف باريك ومعاونوه طريقة لإعادة بناء «فيروس سارس الإكليلى» (SARS coronavirus)، وهى تكنولوجيا مطلوبة من أجل فهم بيولوجيا الفيروس وتطوره[٢]. ومن الجلى أن تلك التكنولوجيا ترفع أيضًا من احتمالات إطلاق الفيروس بصورة متعمدة. ومرة ثانية نصطدم بالطبيعة المزدوجة الفطرية للتكنولوجيات البيولوجية. وغالبية التقنيات البشرية ليست خطيرة فى حد ذاتها؛ وإنما يجعل البشر من التكنولوجيا شيئًا خطيراً من خلال النيَّات والاستخدام. غير أن التكنولوجيا البيولوجية التى تطورها الطبيعة قد تشكل خطورة على البشر دون أى تدخل أو اختراعات من جانبنا، وبواسطة الجهد والبراعة فقط سوف نتمكن من تخفيض أخطار الجوائح العالمية للإنفلونزا وسارس أو الملاريا.

إن الرسالةِ العريضة التى يحملها هذا الكتاب هى أن التكنولوجيا البيولوجية فى طريقها إلى إحداث تغيير فى كلٍّ من اقتصادنا وتفاعلنا مع الطبيعة بطرق جديدة. وتوالى المساحات الزراعية للمحاصيل المعدلة جينيًا النمو بمعدلات بالغة الثبات، ويتم استخدام تلك المحاصيل استخدامات جديدة كل يوم. وثمة سؤال حاسم تجنبته أثناء مناقشة تلك المحاصيل هو مدى المزايا التى تتميز بها المحاصيل المعدلة جينيًا على النباتات غير المعدلة جينيًا. ومع ما يربو على عشر سنوات من الخبرات الحقلية

والسوقية بتلك المحاصيل فى آسيا والأمريكتين الشمالية والجنوبية، نجد أن الإجابة هى بالإيجاب. وعندما يكون أمام المزارعين خيار زراعة تلك المحاصيل فإنهم كثيراً ما يختارونها، ومن المفترض أن اختيارهم يقع عليها لأن لها مزايا وفوائد لهم. غير أن الرأى الجماهيرى يبقى بالغ الاستقطاب. وأخيراً نشر اتحاد العلماء المهتمين بهذا الأمر استعراضًا لما نُشِر من أبحاث خاصة بالمحاصيل المعدلة جينيًا سخر فيها المؤلف من مقولة أن التعديلات الجينية "سوف تلعب دوراً مهمًا فى زيادة إنتاج الطعام"[٣]، وردت منظمة صناعات التكنولوجيا البيولوجية ببيان صحفى سخرت فيه من السخرية الأصلية[٤]، ويستمر الجدل.

وعلى نفس المنوال، يستمر الحوار ملتهبًا حول استخدام المحاصيل فى صناعة الوقود، رغم أن إنتاج الوقود الحيوى على نطاق واسع قد تأخر إلى حد ما بسبب الركود الاقتصادى العالمي. وقد تسبب هذا الركود فى تقلبات كبيرة فى أسعار البترول، مما أسهم فى تقويض قوة الدفع الاقتصادية لإنتاج الوقود الحيوى. ولكن مع استرداد الاقتصاد العالمى لعافيته، فمن المؤكد أن أسعار البترول وأسعار الطعام سوف ترتفع ثانية. والأمل معقود على أن تحسن التكنولوجيات البيولوجية سوف يلطف من حدة المنافسة بين الطعام والوقود بدلاً من أن تستفحل.

إن النقاشات الدائرة حول أفضل وقود حيوى، وأى مسار إنتاجى تحتاج أقل قدر من الطاقة ويطلق أقل انبعاثات لثانى أكسيد الكربون، وأى مواد خام هى أفضلها اقتصادياً وأقلها إيذاءً للبيئة، كلها تعيد تأكيد المقولة الرئيسية للكتاب، وهى أن البيولوجيا ما هى إلا تكنولوجيا. وتقديرنا للبيولوجيا - وتثمينا لها - مثل أى تكنولوجيا أخرى، سوف يتغير مع إدراك المعطيات الجديدة والابتكار المحتوم الذى يستحيل كبحه.

الهوامش

(١) ما البيولوجيا؟

1. Bureau of Economic Analysis. Industry Economic Accounts. "Value added by industry as a percentage of gross domestic product." www.bea.gov/industry/gpotables/gpo_action.cfm?anone=78432&table_id=22073&format_type=o.

2. See the CIA World Factbook. www.cia.gov/library/publications/the-world -factbooklindex.html.

3. Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Market (accessed 20 September 2008).

4. J. Tierney. "An early environmentalist, embracing new 'heresies." New York Times. 27 February 2007.

(٢) البناء بأجزاء بيولوجية

1. SwayStudio. "Purpose." www.swaystudio.comlhonda_movie.html. The press material for the spot describes the plastic pieces as "Mega Bloks." which appear to be a knockoff of products from the famous Danish company. No one could possibly mistake the shape, however.

2. H. Liu, R. Ramnarayanan, and B. E. Logan. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell, Environmental Science & Technology 38. no. 7 (2004): 2281-2285.

3. H. Ceremonie et al.. Isolation of lightning-competent soil bacteria. Appl Environ Microbiol, 70, no. 10 (2004): 6342-6346.

4. J. W. Beaber. B. Hochhut. and M. K. Waldor. S0S response promotes horizontal dissemination of antibiotic resistance genes. Nature 427. no. 6969 (2004): 72-74.

5. N. V. Fedoroff. Agriculture: Prehistoric GM corn. Science 302. no. 5648 (2003): 115S-1159.

6. J. Kaiser. Gene therapy: Seeking the cause of induced leukemias in X-SCID trial. Science 299, no. 5606 (2003): 495; j. L. Fox. US authorities uphold suspension of SCI D gene therapy. Nat Biotechnol 21. no. 3 (2003): 217.

7. N.-B. Woods et al., Gene therapy: Therapeutic gene causing lymphoma, Nature 440. no. 7088 (2006): 1 123.

(٣) تعلُّم الطيران (أو الخميرة والإوز وطائرات ٧٤٧)

1. A. Kvist et al., Carrying large fuel loads during sustained bird flight is cheaper than expected, Nature 413. no. 6857 (2001): 730-732.

2. H. Weimerskirch et al., Energy saving in flight formation. Nature 413. no. 6857 (2001): 697-698.

3. R. H. MacArthur and E. O. Wilson, The Theory of Island Biogeography, Monographs in Population Biology, 1st series (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1967), xi, 203.

4. L.-P. Mouillard, L'empire de l'air: Essai d'ornitbologie appliquee a l'aviation (G. Masson: Paris, 1881).

5. J. Bevo-Higgins, ed., The Chanute-Mouillard Correspondence, April 16, 1890, to May 20, 1897 (San Francisco: E. L. Sterne, 1962) p. 51.

أدت التكلفة والصعوبات المتعلقة بتصنيع الألومنيوم إلى منع انتشار استخدامه في صناعة الطيران إلى ما قبل الحرب العالمية الثانية مباشرة. وفي أثناء سنوات الحرب صُنعت أعداد من الطائرات أكثر من مجموع ما تم صنعه في العقود الأربعة السابقة، ويعود السبب في ذلك إلى السدود الإيدروليكية التي بنيت في الولايات المتحدة وأوروبا في عشرينات وثلاثينات القرن قد وفرت طاقة غزيرة لتنقية الألومنيوم. أنظر

smelting/index.html and /production/www.world-aluminium.org
www.wpafb.af.mil/museum/history/wwii/aaf/aaf30.htm

6. Bevo-Higgins, Chanute-Mouillard Correspondence.

7. يحتوي المتحف القومي للهواء والفضاء على نموذج للطائرة الشراعية الخاصة بليلنثال. وهناك صورة ووصف لها في موقع www.nasm.edu/nasmlaero/aircraft/lilienth.htm.

8. M. D. Ardema, J. Mach, and W. J. Adams, "John Joseph Montgomery 1883 glider," 11 May 1996, American Society of Mechanical Engineers.

تؤرخ كثير من المصادر لهذا الطيران بوصفه حدث سنة ١٨٩٤ وليس في سنة ١٨٩٣ وتقترح أن تجربة ١٨٩٣ كانت محاولة فاشلة لطيران باستخدام محرك وأجنحة ترفرف.

9. M. W. McFarland, ed., *The Papers of Wilbur and Orville Wright, Including the Chanute- Wright Letters and Other Papers of Octave Chanute* (New York: McGraw-Hill,1953)·

10. Ibid.

11.

استمر الجدل طوال المئة سنة الأخيرة حول ما إذا كان الفرنسي كلمنت أدر قد قام بأول طيران بمحرك منذ زمن مبكر يصل إلى ١٨٩٠. غير أن موبار استبعد ذلك طبقًا لتصميمها واعتبرها من الأوهام

(Bevo-Higgins, Chanute-Mouillard CorrApondence, 54).

وبالمثل استنتج الأخوان رايت استحالة طيرانها وادعيا في خطاب أرسلاه إلى شانوت أن هناك شهادة تفيد بذلك من ضابط بالجيش الفرنسي كان حاضرًا عندما قام أدر بتجربته الفاشلة.

(McFarland, Papers of Wilbur and Orville Wright, 952).

12. McFarland, *Papers of Wilbur and Orville Wright.*

13. Ibid.

14. K. Sabbagh, *21st Century Jet: The Making and Marketing of the Boeing 777* (New York: Scribner, 1996),336.

15. Help! There's nobody in the cockpit." *Economist*, 2. I December 2002.

16. D. Voer and. J. G. Voet, *Biochemistry*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1995); I. Levine, *Physical Chemistry* (New York: McGraw-Hill Companies, 1988) .

17.
مجلة تطبيقات العلوم (Roche Applied Science) لشركة روش الدوائية تنشر أوضح الصور لتلك الخرائط. وهي متاحة في موقع بالشبكة العنكبوتية بعنوان: www.expasy.org/cgi-bin/search-biochem-index.

(٤) المجئ الثانى للبيولوجيا الاصطناعية (التخليقية)

1. See "Friedrich-Wohler: Aluminum-and-urea-papers," *Encyclopedia Britannica*, www.britannica.com/EBchecked/topiC/ 646422/Friedrich- Wohler/2599941/ Aluminum-and-urea-papers; "Wohler to Berzelius (1828)," https://webspace .yale.edu/chem125 _f06/125/history99/4RadicalsTypes/UreaLetter1828.html.

2. S. Toby, *Acid test finally wiped out vitalism, and yet*, Nature 408, no. 6814 (2000): 767-767.

3. A.J. Rocke, *The Quiet Revolution: Hermann Kolbe and the Science of Organic Chemistry* (Berkeley: University of California Press, 1993). 60.

4. E. F. Keller, *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2002), 388; quotation, 18.

5. Ibid., 28.

6. Ibid., 31.

7. Ibid.

8. Ibid., 86.

9. W. Szybalski, "In Vivo and in Vitro Initiation of Transcription," in A. Kohn and A. Shatkay, eds., *Control of Gene Expression* (New York: Plenum Press, 1974)·

10. W. Szybalski and A. Skalka, *Nobel prizes and restriction enzymes*, Gene 4, no. 3 (1978): 181-182.

11. S. A. Benner and A. M. Sismour, *Synthetic biology*, Nat Rev Genet, 6, no. 7 (2005): 533-543.

12.
إن أفضل وصف للبيولوجيا بالرسوم الكاريكاتورية هو حرفيًا فيلم كرتوني. وكتب لاري جونيك ومارك ويلس كتابًا بعنوان "الدليل الكاريكاتيري للبيولوجيا" *Guide to Genetics* (New York: Barnes and Noble, 1983) وهو وصف رائع للبيولوجيا الجزيئية ومكتوب بمستوى يسهل على غير العلماء استيعابه. ونجد نسخًا منه لدى العديد من المحترفين.

13. O. T. Avery, C. M. MacLeod, and M. McCarry, *Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types: Induction of transformation by desoxyribonucleic acid fraction isolated from* Pneumococcus Type III, J Exp Med 79, no. 2 (1944): 137·

14. F. Crick, "On Protein Synthesis," at Symposium of the Society of Experimental Biology 12 (1957): 138-163.

15. T. S. Gardner, C. R. Cantor, and J. J. Collins, *Construction of a genetic toggle switch in* Escherichia coli, Nature 403, no. 6767 (2000): 339-342.

16. D. Voer and J. G. Voer, *Biochemistry*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1995).

17. M. B. Elowirz and S. Leibler, *A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators*, Nature 403, no. 6767 (2000): 335-338.

18. D. Endy et al., *Computation, prediction, and experimental tests of fitness for bacteriophage T· mutants with permuted genomes*, Proc Natl Acad Sci U.S A. 97 (2000): 5375-5380.

19. Ibid.

20. L. Y. Chan, S. Kosuri, and D. Endy, *Refactoring bacteriophage* T7, Mol Syst Biol I (2005): 0018.

(٥) تاريخ مستقبلي للهندسة البيولوجية

1. See "Schools participating in iGEM 2006," http://parts2.mit.edu/wiki/index.php/Schools_Participating_in_i GEM_2006.

2. See "Registration FAQ," http://parts2.mit.edu/wiki/index.php/Registration_AQ.

3. S. Berkun, *The Myths of Innovation* (Sebastopol, Calif.: O'Reilly, 2007).

4. J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: Implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic" Research Associates, 2007). 35. W. B. Arthur and W. Polak, "The evolution of technology within a simple computer model," *Complexity*, 2006 11(5): 23-31.

5. M. R. Darby and L. G. Zucker, "Grilichesian breakthroughs: Inventions of methods of "inventing and firm entry in nanotechnology" (Working Paper 9825, National Bureau of Economic Research, Cambridge, Mass., July 2003). Griliches, Zvi, "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change," *Econometrica*, October 1957, 25(4): 501-522.

6. Newcomb, Carlson, and Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures*.

7. P. Brimlow, "The silent boom," *Forbes*, 7 July 1997.

8. Newcomb, Carlson, and Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures*, 57.

(٦) سرعة تغير التقنيات البيولوجية

1. Discovery DNA Explorer Kit, #691907, www.discovery.com.

2. J. Cello, A. V. Paul, and E. Wimmer, *Chemical synthesis of poliovirus cDNA: Generation of infectious virus in the absence of natural template*, Science 297, no. 5583 (2002): 1016-1018.

3. E. Pilkington, "I am creating artificial life, declares US gene pioneer," *Guardian*, 6 October 2007; D. G. Gibson et al., *Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a* Mycoplasma genitalium *genome*. Science 319, no. 5867 (2008): 1215·My sources

for Figure 6 include: Khorana, H. G., *Total synthesis of a gene*. Science, 1979.203(4381): 614-625; Mandecki. W., et al., *A totally synthetic plasmid for general cloning, gene expression and mutagenesis in Escherichia coli*. Gene, 1990. 94(1): 103-107; Stemmer, W. P., et al., *Single-step assembly of a gene and entire plasmid from large numbers of oligodeoxyribonucleotides*. Gene, 1995· 164(1): 49-53; Cello, J., A. V. Paul, and E. Wimmer, *Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template*. Science, 2002. 297(5583): 1016-1018; Tian, J., et al., *Accurate multiplex gene synthesis from programmable DNA microchips*. Nature, 2004. 432(7020): 1050-1054; Kodumal, S. J., et al., *Total synthesis of long DNA sequences: synthesis of a contiguous 32-kb polyketide synthase gene cluster*. Proc Natl Acad Sci USA, 2004. 101(44): 15573-15578; Gibson, D. G., et al., *One-step assembly in yeast of 25 overlapping DNA fragments to form a complete synthetic Mycoplasma genitalium genome*. Proc Natl Acad Sci USA, 2008. 105(51): 20404-20409.

4· G. Moore, *Cramming more components onto integrated circuits*, Electronics 38, no. 8 (1965):114-117.

5. Ibid., 114.

6. M. Ronaghi, Pyrosequencing sheds light on DNA sequencing, Genome Research II, no. 1 (2001): 3-11.

7· "Nobel laureate James Watson received personal genome," 13 August 2007, available at www.sciencedaily.com/releasesho07/05/0705311180739.htm .

8. F. S. Collins, M. Morgan, and A. Patrinos, *The Human Genome Project: Lessons from large-scale biology*, Science 300, no. 5617 (2003): 286-290.

9· S.-C, J. Chen, "Under new management,"*The Economist*, April 2, 2009.

10. Genome Technology, editorial, April 2001. (magazine)

11. E. S. Lander et al., *Initial sequencing and analysis of the human genome*, Nature 409, no. 6822 (2001): 860-921.

12. R. F. Service. Gene sequencing: *The race for the S 1000 genome*, Science 3 11, no. 5767(2006): 1544-1546.

13. D. S. Kong et al., *Parallel gene synthesis in a microfluidic device*, Nucl Acids Res 35, no. 8 (2007): e61.

14. P. A. Carr et al., *Protein-mediated error correction for de novo DNA synthesis*, Nucl Acids Res 32, no. 20 (2004): e162.

15. Brian Baynes, Codon Devices, personal communication.

16. Braslavsky et al., *Sequence information can be obtained from single DNA molecules*, Proc Natl Acad Sci U.S.A. 100, no. 7 (2003): 3960-3964.

17. See, for example, Garner Lab, http://innovation.swmed.edu/Instrumentation/ mermade_oligonucleotide_synthesi.h tm.

18. DNA Synthesis Panel, International Conference on Synthetic Biology 2.0, University of California, Berkeley.

19·Map of commercial gene foundaries, http://synthesis.typepad.com/synthesis/ 2005/07/global_distribu.html.

20. "A genome shop near you." *Wired*, December 2005, www.wired.com/wired/archive/13.12/start.html?pg=16; J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: Implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2007), 16.

21. M. Garfinkel et al., *Synthetic Genomics: Options for Governance* (Rockville, Md.: J. Craig Venter Institute, in collaboration with CSIS, MIT, 2007).

22. H. Bugl et al., *DNA synthesis and biological security*, Nat Biotech 25, no. 6 (2007): 627.

(٧) المسابقة الدولية لأجهزة الهندسة الوراثية

1. P. Di Martino et al., *Indole can act as an extracellular signal to regulate biofilm formation of Escherichia coli and other indole-producing bacteria*, Canadian journal of Microbiology 49, no. 7 (2003): 443; J. Lee, A. jayaraman, and T. K. Wood, *Indole is an inter-species biofilm signal mediated by SdiA*, BMC Microbiol 7 (2007): 42 .

2. Shetty, Reshma, "Applying engineering principles to the design and construction of transcriptional devices," Thesis (PhD), MIT, Biological Engineering Division, 2008; Regarding the educational experience of the undergraduates: Reshma Sherry, personal comm.

3. C. Mead and L. Conway, *Introduction to VLSI Systems* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980).

4. G. Smith, "Unsung innovators: Lynn Conway and Carver Mead," *Computer world*, 3 December 2007.

5. "Thoughts on the biology/EECS relationship," Tom Knight, 23 January 2003, additions 26 May 2005, www.eecs.mit.edu/bioeecs/Knigh_essay.html.

6. Ibid.

7. "2005 supplement," at "Parts, devices, systems & engineering theory," http://parts.mit.edu/wiki/index. php/Parts % 2C_Devices % 2C_Systems_ % 26 _Engineerin~ Theory.

8. For descriptions of the IAP projects, see "IAP 2003 and IAP 2004 Projects," http://parts.mit.edu/projects/index.cgi.

9. Reshma Shetty, personal communication.

10. For a firsthand account of iGEM 2004, see A. M. Campbell, *Meeting report: Synthetic biology jamboree for undergraduates*, Cell Biology Education 4 (2005): 19-13.

11. See also D. Endy, *Foundations for engineering biology*, Nature 438, no. 7067 (2005): 449.

12. See "SBC 2004-UT Austin," hrrp://parts.mit.edu/r/parts/htdocs/SBC04/austin .cgr.

13. A. Levskaya et al., *Synthetic biology Engineering* Escherichia coli *to see light*, Nature 438, no. 7067 (2005): 441.

14. Christopher Voigt, personal communication.

15. In order to be correctly assembled by the cell, BBa_I15010 requires the presence of two other parts, genes that code for proteins necessary to preprocess metabolites into components of the photoreceptor complex. These genes are defined in the specification for the phototransducer but play no role in the real-time function of the transducer.

16. Levskaya, *Synthetic biology*, 441.

17. See Campbell, *Meeting report*.

18. See "iGEM 2005," http://parts.mit.edu/wiki/index.php/Igem_2005.

19. E. Check, *Synthetic biology: Designs on life*, Nature 438, 110. 7067 (2005): 417.

20. See "iGEM 2005."

21. Check, *Synthetic biology*, 417.

22. See www.igem2006.com/jamboree.htm. For a map of participating schools, see www.igem 2006.com/meet.htm.

23. See "iGEM 2006 jamboree results," www.igem2006.com/resulrs.htm.

24. See www.igem2006.com/presentarions.htm.

25. See IET Synthetic Biology I, issues 1-2 (June 2007): 1-90, http://scitation .aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=ISBEBU&Volume=CURVOL&Issue=CURISS.

26. See "Engineered human cells: Say no to sepsis," http://parts.mit.edu/wiki/index .phpl Ljubljana%2C_Slovenia_2006.

27. See *Deaths: Final data for 2005*, National Vital Statistics Report 56, no. 10, www.cdc.gov/nchs/data/nvsrlnvsrs6/nvsr56_10.pdf; F.Jaimes, *A literature review of the epidemiology of sepsis in Latin America*, Rev Panam Salud Publica 18, no. 3 (2005): 163-171.

28. See "Programmed differentiation of mouse embryonic stem cells using artificial signaling pathways," http://parts.mit.edu/wiki/index.php/Princeton:Project _Summary.

29. Ron Weiss, personal communication.

30. See "Towards an assessment of the socioeconomic impact of arsenic poisoning in Bangladesh," World Health Organization, 2000, www.who.int/water _sanitation_health/dwq/arseniC2/enlindex.html.

31. Chris French, personal communication.

32. See iGEM 2007 wiki, http://parts.mit.edu/igem07/index.php/Main_Page.

33. See "Towards self-differentiated bacterial assembly line," http://parts.mit.edu/ igem07/index.phplPekin~The_Projects.

34. See "The SMB: Synthetic multicellular bacterium," http://parts.mit.edu/igem07/ index.phplParis.

35. See "USTC iGEM 2007," http://parts.mit.edu/igem07/index.php/USTC.

36. See "Location, location, location: Directing biology through synthetic assemblies and organelles," http://parts.mit.edu/igem07/index.php/UCSF.

37. See "Bactoblood," http://parts.mit.edu/igem07/index.php/Berkeley_UC.

38. See."Virotrap: A synthetic biology approach against HIV," http://parts.mit.edul igernoy/index.php/Ljubljana.

39. See, for example, "Moore's Law," www.intel.com/technology/mooreslaw/index .htm?iid=intel_tl+moores_law.

(٨) إعادة برمجة الخلايا وبناء الجينومات

1. j. D. Keasling, "Synthetic biology in pursuit of low-cost, effective, anti-malarial drugs" (presentation at the Institute for Systems Biology Seventh Annual international Symposium, Seattle, Wash., 21 April 2008).

2. M. Ettling et al., *Economic impact of malaria ill Malawian households*, Trop Med Parasitol 45, I (1994): 74-79; J. M. Chuma, M. Thiede, and C. S. Molyneux, *Rethinking the economic costs of malaria at the house-hold level: Evidence from applying a new analytical framework in rural Kenya*, Malar J 5 (2006): 76. See also "The World Health Organization, Health and Environment Linkages Initiative: Human toll and economic costs of malaria," www.who.int/heli/risks/vectors/malariacontrol/en/index1.html.

3. Sandi Doughron, "Gates Foundation tackles a giant that preys on Africa's children," *Seattle Times*, 6 February 2008.

4. J. L. Gallup and J. D. Sachs, *The economic burden of malaria*, American Journal of Tropical Medicine and Hygiene 64, suppl. I (2001): 85.

5. See "Economic costs of malaria are many times higher than previously estimated," 25 April 2.000, www.malaria.org/news239·html.

6. Ibid.

7. Bill Rau, "Too Poor to be Sick: Linkages Between Agriculture and Health," UN/FAO, 2.006.

8. For a brief history, see N. J. White, Qinghaosu (artemisinin): *The price of success*, Science 320, no. 5874 (2008): 330-334.

9. Jay Keasling, "Synthetic biology in pursuit of low-cost, effective, anti-malarial drugs."

10. S. Connor, "Malaria: A miracle in the making offers hope to millions worldwide," *Independent*, 4 June 2008.

11. V. J. Martin et al., *Engineering a mevalonate pathway in Escherichia coli for production of terpenoids*, Nat Biotechnol 21, no. 7 (.2003): 796-802.

12. Keasling, "Synthetic biology in pursuit of low-cost, effective, anti-malarial drugs."

13. Ibid.

14. S. T. Payne et al., Eau d'E coli: Rapid prototyping of a genetically-encoded olfactory reporter system, 2008, MIT.

15. On the billionfold increase in yield, see Jay Keasling, UC Berkeley Faculty Forum on the Energy Biosciences institute, 8 March 2007, http://webcast.berkeley.edu/event_details. php?webcastid=19207&p= I &ipp= 1000&category=; on the necessary increase in yield to make production economically

viable, see Keasling, "Synthetic biology in pursuit of low-cost, effective, anti-malarial drugs."

16. Ibid.

17. M. H. Serres, S. Goswami, and M. Riley, GenProtEC: *An updated and improved analysis of functions of* Escherichia coli *K-12 proteins*, Nucleic Acids Res 32, database issue (2004): D300-D302.

18. For genome length, see G. Posfai et al., *Emergent properties of reduced-genome* Escherichia coli, Science 312, no. 5776 (2006): 1044-1046; for Clean Genome *E. coli*, see Scarab Genomics, "Products," www.scarabgenomics.com.

19. Posfai et al., *Emergent properties of reduced-genome* Escherichia coli.

20. Tom Knight, Second International Conference on Synthetic Biology (University of California, Berkeley, May 2006).

21. Tom Knight, "Thoughts on the biology/EECS relationship," 23 January 2003, additions 26 May 2005, www.eecs.mit.edu/bioeecs/Knight_eessay.html.

22. D. G. Gipson et al., *Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a Mycoplasma genitalium genome*, Science 319, no. 5867 (2008): 12 15.

23. Clyde Hutchison, Fourth International Conference on Synthetic Biology (Hong Kong University of Science and Technology, 10 October 2008).

24. Ibid.

25. D. G. Gibson et al., *One-step assembly in yeast of 25 overlapping DNA fragments to form a complete synthetic* Mycoplasma geniralium genome, Proc Natl Acad Sci U.S.A. 105, no. 51 (2008): 2.0404-20409.

26. A. Pollack, "Scientists take new step toward man-made life," New York Times, 24 January 2008.

27 . J. I. Glass et al., *Essential genes of a minimal bacterium*, Proc Natl Acad Sci U.S.A. 103, no. 2. (2006): 42.5-430.

28. See Craig Venter, "Creating life in a lab using DNA," *Telegraph*, 16 October, 2007.

29: Z. Shao and H. Zhao, *DNA assembler, an in vivo genetic method for rapid construction of biochemical pathways*, Nucleic Acids Res 37, no. 2. (2009): e16.

(٩) بشـائر التكنولوجيا البيولوجية وأخطارها

1. M. Enami et al., *Introduction of site-specific mutations into the genome of influenza virus*, PNAS 87, no. 10 (1990): 3802.-3805.

2. G. Neumann et al., *Generation of influenza A viruses entirely from cloned cDNAs*, PNAS 96, no. 16 (1999): 9345-9350.

3. G. Neumann et al., *An improved reverse genetics system for influenza A virus generation and its implications for vaccine production*, PNAS 102., no. 46 (2005): 16825-16829.

4·*The 1918 flu virus is resurrected*, Nature 437, no. 7060'(2005): 794.

5. J. c. Kash et al., *Genomic analysis of increased host immune and cell death responses induced by 1918 influenza virus*, Nature 443, no. 7111 (2006): 578.

6. D. Kobasa et al., *Aberrant innate immune response in lethal infection of macaques with the 1918 influenza virus*, Nature 445, no. 7125 (2007): 319.

7. Y.-M. Loo and M. Gale, *Influenza: Fatal immunity and the 1918 virus*, Nature 445, no. 7125 (2007):-267.

8.

إن الطلبات المتكررة التي وُجّهت إلى جفري تاونبرجر لتوضيح موضوع سهولة إعادة تكوين فيروس الإنفلونزا لم تلق استجابة منه حتى عندما توسط فيها أحد معاونيه. وبالرغم من أن تحفظه وكتمانه في هذا الشأن قد يكون أمرًا محبطًا من وجهة نظري فإنه أمر مفهوم على المستوى الشخصي والمهني وربما يكون جزءًا من استراتيجية حكومية أو عسكرية لاحتواء انتشار المعلومات. غير أن المزيد من المناقشات المنفتحة سوف يثري كلًا من المناقشات السياسية والعلوم الأساسية.

9. CDC, "Influenza activity-United States and worldwide, 2007-08 season," *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 26 June 2008.

10. *The 1918 flu virus is resurrected.*

11. M. Garfinkel et al., *Synthetic Genomics: Options for Governance* (Rockville, Md.: J. Craig Venter Institute, in collaboration with CSIS, MIT, 2007), 12.

12. *The 1918 flu virus is resurrected.*

13. C. Sheridan, *Next generation flu vaccine boosted by Chiron debacle*, Nat Biotechnol 22, no. 12 (2004): 1487-1488.

14. On government participation in the market, see *National Strategy for Pandemic Flu*, Homeland Security Council, the White House, 2005, at www .pandemicflu.gov; on existing technologies' ability to produce sufficient number's of doses, see M. T. Osrerholm, *Preparing for the next pandemic*, N Engl J Med 352, no. 18 (2005): 1839-1842; Statement of Marcia Crosse, Director, Health Care, testimony before the Subcommittee On Health, Committee on Energy and Commerce, House of Representatives, influenza Pandemic: *Challenges Remain in Preparedness* (Washington D.C.: Government Accountability Office, 2005); D. Butler, *Bird flu vaccine not up to scratch*, Nature News, 10 August 2005.

15. *BBC News*, "Gloomy estimate of bird flu costs," http://news.bbc.co.uk/I/hi/world/asia-pacific/4414668.stm; World Bank, http://siteresources. worldbank .org/INTEAPHALFYEARLYUPDATE/Resources/EAP-Brief-avian-flu.pdf.

16. R. Carlson, *The pace and proliferation of biological technologies*, Biosecur Bioterror I, no. 3 (2003): 203-214; National Research Council, Biotechnology research in a age of terrorism (Washingron, D.C.: National Academies Press, 2004).

17. See WHO, "Summary of probable SARS cases with onset of illness from 1 November 2002 to 31 July 2003," www.who.int/csr/sars/country/table2004_04_21/en/index.html.

18. R. S. Baric, *SARS-CoV: Lessons for global health*, Virus Res 133, no. 1 (2008): 1-3.

19. M. A. Marra, *The Genome sequence of the SARS-associated coronavirus*, Science 300, no. 5624 (2003): 1399-1404.

20. Ralph Baric, personal communication.

21. B. Yount, K. M. Curtis, and R. S. Baric, *Strategy for systematic assembly of large RNA and DNA genomes: Transmissible gastroenteritis virus model*, J Virol 74, no. 22 (2000): 10600-10611.

22. Z. Y. Yang et al., *A DNA vaccine induces SARS coronavirus neutralization and protective immunity in mice*, Nature 428; no. 6982 (2004): 561:-564.

23. C. Fraser et al., *Factors that make an infectious disease outbreak controllable*, Proc Natl Acad Sci U.S.A. 101, no.16 (2004): 6146:-6151.

24. Ibid.

25. Robert Carlson, "Nature is full of surprises, and we are totally unprepared," www.synthesis.cc/2006/03/nature-is-full-of-surprises-and - we-are-totally -unprepared.html (first published on the Web on 5 March 2006).

26. H. Chen et al., *Establishment of multiple sublineages of H_5N_1 influenza virus in Asia: Implications for pandemic control*, Proc Natl Acad Sci U.S.A. 2006.

27. Ibid.

28. Ibid.

29. WHO, "Antigenic and genetic characteristics of H_5N_1 viruses and candidate H_5N_1 vaccine viruses developed for potential use as pre-pandemic vaccines," www.who.int/csr/disease/avian_influenza/guidelines/h5 n1virus2006_08_18/ en/index.html (accessed IS August 2006).

30. E. Ghedin et al., *Large-scale sequencing of human influenza reveals the dynamic nature of viral genome evolution*, Nature 437, no. 7062 (2005): 1162-1166.

31. K. L. Russell et al., *Effectiveness of the 2003-2004 influenza vaccine among U.S. military basic trainees: A year of suboptimal match between vaccine and circulating strain*, Vaccine 23, no. 16 (2005): 1981.

32. On pediatric deaths, see CDC, "Update: Influenza activity-United States and worldwide, 2003-04 season, and composition of the 2004-05 influenza vaccine," *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2 July 2004, 547-552, www .cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtl/mm5325a1.htm; on jump in overall mortality, see CDC, "CDC 2003-04 U.S. influenza season summary," www.cdc gov/flu/weekly/archives2003-2004/0 3-04summary. htm.

33. S. Salzberg, *The contents of the syringe*, Nature 454, no. 7201 (200S): L60.

34. National Intelligence Council, "National Intelligence Estimate: The global infectious disease threat and its implications for the United States" (2000).

35. "SARS: Timeline of an outbreak," http://my.webmd.com/content/article/ 63/72068.htm; U.S. General Accounting Office, "West Nile virus outbreak: Lessons for public health preparedness," www.gao.gov/new.items/heoo180 .pdf.

36. A. Mandavilli, *SARS epidemic unmasks age-old quarantine conundrum*, Nat Med 9, no. 5 (2003): 487.

37. R. G. Webster and E. A. Govorkova, *H_5N_1 influenza-continuing evolution and spread*, N Engl J Med 355, no. 21 (2006): 2174-2177; A. F. Oner et al., *Avian influenza A (H_5N_1) infection in eastern Turkey in 2006*. N. Engl. J. Med 355, no. 21 (2006): 2179-2185; I. N. Kandun et al., *Three Indonesian clusters of H_5N_1 virus infection in 2005*, N Engl J Med 355, no. 21(2006): 2186-2194.

38. N. M. Ferguson et al., *Strategies for mitigating an influenza pandemic*, vol. 442 Nature (2006): 448-452.

39. C. Sheridan, *Production technologies change flu vaccine landscape*, Nat Biotechnol 25, no. 7 (2007): 701.

40. G. M. Forde, *Rapid-response vaccines-does DNA offer a solution?* Nat Biotechnol 23, no. 9 (2005): 1059-1062.

41. W. Gao et al., *Protection of mice and poultry from lethal H_5N_1 avian influenza virus through adenovirus-based immunization*, J Viral 80, no. 4 (2006): 1959-1964.

42. For additional details, see J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: Implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2007).

43. Ibid.

44. Carlson, *Pace and proliferation of biological technologies*.

45. E. D. Sevier and A. S. Dahms, *The role of foreign worker scientists in the US biotechnology industry*, Nat Biotechnol 20, no. 9 (2002): 955-956.

46. U.S. Department of Justice, usdoj.gov/dea/pubs/state_facrsheets.html.

47. U.S. Drug Enforcement Administration, "Methamphetamine," www.usdoj.gov/dea/concern/meth.html.

48. U.S. Drug Enforcement Administration, "Stars and facts," www.usdoj.gov/dea/statistics.html.

49. U.S. Drug Enforcement Administration, "Maps of methamphetamine lab incidents," www.dea.gov/concern/map-.ab_seizures.html.

50. See U.S. Drug Enforcement Administration, "National drug threat assessment 2007," www.usdoj.gov/dea/concern/18862/index.htm.

51. On the increase in meth use, see the U.S. Drug Enforcement Administration's statistics page at www.dea.gov/statistics.html; on the amount of meth seized at the border, see U.S. Drug Enforcement Administration, "Methamphetamine."

52. National Methamphetamine Threat Assessment 2007," *National Drug Intelligence Center*, November 2006, usdog.gov/ndic/pubs21/21821/overview.html.

53. BBC News. "Drug submarine found in Colombia," http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/915059.stm.

54. "Waving, not drowning." *Economist*, 3 May 2008.

55. See U.S. Department of Justice, "Methamphetamine strategic findings," www.usdoj.gov/dea/concern/18862/meth.htm#Strategic.

56. G. S. Pearson, *How to make microbes safer*, Nature 394, no. 6690 (1998): 217-218.

57. *The Kay Report to Congress on the activities of the Iraq Survey Group: Former bioweapons inspectors comment*, Biosecurity and Bioterrorism 1, no. 4 (2003): 239-246.

58. J. Huang et al., *Plant biotechnology in China*, Science 295, no. 5555,(2002): 674-678.

59. R. Stone, *Plant science: China plans $3.5 billion GM crops initiative*, Science 321, no. 5894 (2008): 1279.

60. H. Jia, *Chinese biotech hamstrung by production issues*, Nat Biotech 25, no. 2 (2007): 147.

61. H. Breithaupt, *China's leap forward in biotechnology*, EMBO Rep 4, no. 2 (2003): 111-113.

62. S. Pearson, H. Jia, and K. Kandachi, *China approves first gene therapy*, Nat Biotechnol 22, no. 1 (2004):3-4.

63. G. Epstein, *Global Evolution of Dual-Use Biotechnology* (Washington, D.C: Center for Strategic and International Studies, 2005); Charles Cantor, "Global evolution of dual-use biotechnology: 2020" (presentation at the National Intelligence Council Conference, Center for Strategic and International Studies, Washington, D.C, 18 March 2004).

64. A. R Taylhardat and A. Falaschi, *Funding assured for India's international biotechnology centre*, Nature 409, no. 6818 (2001): 281: "India commits' to boosting biotechnology research," Nature 450, no. 599 (2007); K. S. Jayaraman, *India promotes GMOs in Asia*, Nat Biotechnol 20, no. 7 (2002): 641-642.

65. *Singapore attracts foreign talent*, Nature 394 (1998): 604.

66. D. Swinbanks and D. Cyranoski, *Taiwan backs experience in quest for biotech success*, Nature 407, no. 6802 (2000): 417-426; D. Cyranoski, *Taiwan: Biotech vision*. Nature 421, no. 6923 (2003): 672-673.

67. H. Bugl et al., *DNA synthesis and biological security*, Nat Biotech 25, no. 6 (2007): 627.

68. C Dreifus, "A conversation with: Robert C Richardson: The chilling of American science," New York Times, 6 July 2004.

(١٠) منابع الابتكار وتأثيرات القوانين الحالية والمقترحة

1. W. B. Arthur. *The structure of invention*, Research Policy 36, no. 2 (2007): 274.

2. W. Baumol, *Small Firms: Why Market-Driven Innovation Can't Get Along without Them* (Washington, D.C: U.S. Small Business Administration, 2005), 183.

3. This particular list is from Baumel, *Small Firms*, from the original in U.S. Small Business Administration, Office of Advocacy, *The State of Small Business: A Report to the President* (Washington, D.C: Government Printing Office, 1994).

4. National Science Foundation, Division of Science Resources Statistics, "Research and development in industry: 2003," NSF 07-314 (2006). www.nsf.gov/statistics/nsfo7314/start.cfm P30.

5. National Research Council, *Funding a Revolution: Government Support for Computing Research* (Washington, D.C: National Academies Press, 1999).

6. "Less glamour, more profit," *Economist*, 22 April 2004.

7. Baumol, *Small Firms*, 187.

8. Ibid.

9. Peregrine Analytics, *Innovation and Small Business Performance: Examining the Relationship between Technological Innovation and the Within-Industry Distributions of Fast Growth Firms* (Washington, D.C: U.S. Small Business Adminstration, 2006).

10. Baumol, Small Firms, 199.

11. Ibid, 184.

12. J. Randerson, "Lax laws, virus DNA and potential for terror," *Guardian*, 14 June 2006; J. Randerson, "Revealed: The lax laws that could allow assembly of deadly virus DNA," *Guardian*, 14 June 2006.

13. Randerson," Revealed."

14: Ibid.

15· "Newspaper investigation highlights bioterror fears," In the Field: The *Nature* Reporters' Blog from Conferences .and Events, *Nature.com*, 14 "June 2006, http://blogs.nature.com/news/blog/2006/06/newspaper_investigation_highli.html.

16. See "Revised NSABB charter," signed 16 March 2006, http://www.biosecurity board.gov/revised% 20NSABB%20charter%20signed%2003 1606.pdf.

17. See National Select Agents Registry, "Frequently asked questions," http://www.selectagents.gov/NSARFaq.htm.

18. See Center for Infectious Disease Research and Policy, "Smallpox summary" page, http://www.cidrap.umn.edu/cidrap/content/bt/smallpox/biofacts/smllpx-summary.html.

19. M. Enserink, *BIODEFENSE: Unnoticed amendment bans synthesis of smallpox virus*, Science 307, no. 5715 (2005): 1540a-1541a.

20. Y. Bhattacharjee, *Smallpox law needs fix*, Science NOW, 25 October 2006.

21. Enserink, *BIODEFENSE*, 1541.

22. National Science Advisory Board for Biosecurity, *Addressing Biosecurity Concerns Related to the Synthesis of Select Agents* (2006), 12, oba.od.nih.gov/biosecurity/biosecurity_documents. html.

23. Committee on Advances in Technology and the Prevention of Their Application to Next Generation Biowarefare Threats, National Research Council, *Globalization, Biosecurity, and the Future of the Life Sciences* (Washington, D.C.: National Academies Press, 2006), 218.

24. Full disclosure: I briefed this committee during deliberations and served as an academic reviewer prior to publication.

25. National Science Advisory Board for Biosecurity, *Addressing Biosecurity Concerns*, 12.

26. Full disclosure: I briefed this committee during deliberations and served as an academic reviewer prior to publication. M. Garfinkel et al., *Synthetic Genomics: Options for Governance* (Rockville, Md.: J. Craig Verner Institute, in collaboration with CSIS, MIT, 2007), 6; quotations, I, ii.

27. Ibid.

28. Ibid., 27.

29. BBC News, "Bugging the boardroom," 5 September 2006, http://news.bbc .co.uk/2/hi/technology/5313772.stm.

30. J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: Implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2007).

31. Garfinkel et al., *Synthetic Genomics*.

32. Note that the probable emergence of a market for such an instrument is a hypothesis, and time will provide the experimental test.

33. R. Carlson, *The pace and proliferation of biological technologies*, Biosecur Bioterror 1, no. 3 (2003): 203-214.

34. K. Kelly, "The futility of prohibitions," 2006, available at www.kk.org/ thetechnium/archives/2006/02/the_futility_of. ph p.

35. Ibid.

(١١) وضع الأسس لاقتصادٍ بيولوجي

1. See the USDA report, "Productivity growth in U.S. agriculture," www.ers .usda.gov/publications/eb9.

2. J. Hodgson, *Private biotech 2004-the numbers*, Nat Biotech 24, no. 6 (2006): 635.

3. See the CIA *World Factbook*, www.cia.gov/library/publications/the-world -factbook/index.html.

4. M. Herper and P. Kang, "The world's ten best-selling drugs," Forbes, 22 March 2006: S. Aggarwal, *What's fueling the biotech engine?* Nat Biotech 25, no. 10 (2007): 1097; Herper and Kang, "The world's ten best-selling drugs."

5. Herper and Kang, "The world's ten best-selling drugs"; Aggarwal, *What's fueling the biotech engine?*

6. A. Berenson, "Weak sales prompt Pfizer to cancel diabetes drug," *New York Times*, 19 October 2007.

7. Ibid.; .Aggarwal, *What's fueling the biotech engine?*; "TOP 20 Biologics 2008,(R&D Pipeline News, La Merie Business Intelligence, www.bioportfolio.com.

8. Ibid.

9. Y. Ozdemir et al.. *Shifting emphasis from pharmacogenomics to theragnostics*, Nat Biotech 24, no. 8 (2006): 942.

10. Ibid.

11. "Beyond the blockbuster."

12. Ibid.

13. The latest data is from 2004, and the U.S. economy has been growing at about 4 percent per year. See "The statistical abstract," www.census.gov/compendia/ statab.

14. D. Pimentel, R. Zuniga, and D. Morrison, *Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States*, Ecological Economics 52, no. 3 (2005): 273.

15. S. Lawrence, *Agbiotech booms in emerging nations* Nat Biotech 25, no. 3 (2007): 271.

16. For percentages of GM crops, see" Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S.," Economic Research Service, USDA, www.ers.usda.gov/Data/ BiotechCrops/; for total crop revenues, see the "Data and Statistics" page, National Agricultural Statistics Service, USDA, www.nass.usda.gov/Data_and _Statistics/Quick_Stats/index.asp.

17. See Hepeng jia, "Big funding for GM research," *Chemistry World*, 26 March 2008, www.rsc.org/chemistryworld/News/2008/March/26030801_.asp.

18. James, Clive) "Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008," International Service for the Acquisition "of Agri-Biotech Applications, ISAAA Brief No. 39. ISAAA: Ithaca, NY.

19. "The next green revolution," *Economist*, 21 February 2008.

20. See, for example, Biotechnology Industry Organization, "Agricultural production applications," http://bio.org/speeches/pubs/er/agriculture.asp.

21. P. Mitchell, *GM giants pair up to do battle*, Nat Biotech 25,"no. 7 (2007): 695.

22. P. Mitchell, *Europe's anti-GM stance to presage animal feed shortage?* Nat Biotech 25, no. 10 (2007): 1065.

23. J. L. Fox, *US courts thwart GM alfalfa and turf grass*, Nat Biotech 25, no. 4 (2007): 367.

24. Pimentel, Zuniga, and Morrison, *Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States*.

25. "Industrial biotechnology-turning potential into profits," *Europabio Bio-Economy Newsletter*, September 2006.

26. S. Herrera, *Industrial biotechnology - a chance at redemption*, Nat Biotech 22, no.6 (2004): 671; "Field of dreams." *Economist*, 7 April 2004.

27. "Industrial Biotechnology-Turning Potential into Profits," EuropaBio Bio-Economy Newsletter, September, 2006; Riese, Jense, "White Biotechnology Press Briefing," McKinsey & Company, February 2009.

28. S. Aldrich, J. Newcomb, and R. Carlson, *The Big Squeeze: New Fundamentals for Food and Fuel Markets* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2008).

29. P. Westcott, "U.S. ethanol expansion driving changes throughout the agricultural sector," *Amber Waves*, September 2007.

30. J. Newcomb, "Chomp! Chomp! Fueling the new agribusiness," *CLSA Blue Books*, April 2007.

31. Ibid.

32. K. Fuglie, "Productivity drives growth in U.S. agriculture," *Amber Waves*, September 2007.

33. W. Bi, "Increasing domestic demand could cut China's corn exports," Bloomberg via *Livemint.com/Wall Street Journal*, 24 March 2007, www . livemint .com/2007/03/24022323/Increasing-domestic-demand-cou.html.

34. See Green Car Congress, "China halts expansion of corn ethanol industry: Focus on biomass feedstocks," www.greencarcongress.com/2006/12/china_halts_exp.html.

35. A. Barrionuevo, "Boom in ethanol reshapes economy of heartland," *New York Times*, 25 June 2006.

36. "Cheap no more," *Economist*, 6 December 2007.

37. C. Krauss, "Ethanol's boom stalling as glut depresses price," *New York Times*, 30 September 2007.

38. P. Barta, "Promising crop: Jatropha plant gains steam in global race for biofuels, Hardy shrub is tapped for energy-rich seeds; Indian farmers' big bet," *Wall Street Journal*, 24 August 2007.

39. "China to subsidize jatropha planting for biodiesel," Reuters, 5 June 2007.

40. A. Hind, "Could jatropha be a biofuel panacea?" *BBC News*, 8 July 2007.

41. For a simple description of the structure of the plant cell wall, see "Fuel ethanol production" from the Genomes to Life (GTL) program at the U.S. Department of Energy, http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/ethanolproduction.shtml.

42. See "BP, ABF and DuPont unveil $400 million investment in UK biofuels," www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=2012968&contentId=7034350.

43. R. Chase, "DuPont, BP join to make butanol: They say it outperforms ethanol as a fuel additive," *USA Today*, 20 June 2006.

44. See, U.S. Department of Energy, "DOE selects six cellulosic ethanol plants for up to $385 million in federal funding," 28 February 2007, www.doe.gov/ news/4827·htm.

45. P. Grace et al., *The potential impact of agricultural management and climate change on soil organic carbon of the north central region of the United States*, Ecosystems 9, no. 5 (2006).

46. S. M. Ogle et al., *Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for us agricultural lands between 1982 and 1997*, Global Change Biology 9, no. 11 (2003): 1521-1542.

47. P. G. Johnson et al., *Pollen-mediated gene flow from Kentucky bluegrass under cultivated field conditions*, Crop Science 46, no. 5 (2006): 1990; L. S. Watrud et al., *From the cover: Evidence for landscape-level, pollen-mediated gene flow from genetically modified creeping bentgrass with CP 4 EPSPS as a marker*, PNAS 101, no. 40 (2004): 14533; J. R. Reichman et al., *Establishment of transgenic herbicide-*

resistant creeping bentgrass (Agrostis stolonifera L.) in nonagronomic habitats, Molecular Ecology 15, no. 13 (2006): 4243.

48. S. I. Warwick et al., *Do escaped transgenes persist in nature? The case of an herbicide resistance transgene in a weedy Brassica rapa population*, Molecular Ecology 17, no. 5 (2007): 1387-1395.

49. I. A. Zelaya, M. D. K. Owen, and M. J. VanGessel, *Transfer of glyphosate resistance: Evidence of hybridization ill Conyza* [Asrernceae), American Journal of Botany 94, no. 4 (2007): 660.

50. D. Tilman et al., *Diversity and productivity in a long-term grassland experiment*, Science 294, no. 5543 (2001): 843.

51. D. Tilman, j. Hill, and C. Lehman, *Carbon-negative biofuels from lour-input high-diversity grassland biomass*, Science 314, no. 5805 (2006): 1598 .

52. M. R. Schmer et al., *Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass*, PNAS 105. no. 2 (2008): 464-469.

53· E. A. Heaton, "Miscanthus bioenergy: Achieving the 2015 yield goal of switchgrass" (paper presented at the Biomass Symposium, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007).

54· "Hybrid grass may prove to be valuable fuel source," *Science Daily*, 30 September 2005.

55· C. Wyman, "More on biofuels discussion," *Chemical and Engineering News*, 24 March 2008; U.S. Energy Information, "Petroleum basic statistics," www.eia.doe.gov/basics/quickoil.html; R. Lubowski et al., "Major uses of land in the United States, 2002," *Economic Information Bulletin*, no. EIB-14, May 2006, USDA Economic Research Service.

56. J. Fargione et al., *Land clearing and the biofuel carbon debt*,. Science 319, no. 5867 (2008): 1235-1238.

57. T. Searchinger et al., *Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change*, Science 319, no. 5867 (2008): 1238-1240.

58. See "New studies portray unbalanced perspective on biofuels: DOE committed to environmentally sound biofuels development," 23 May 2008, and "DOE response to Science magazine article [DOE actively engaged in investigating the role of biofuels in greenhouse gas emissions from indirect land use change]," wwwl.eere.energy.gov/biomass/news_detail.html?news _id= 11794.

59. "Cheap no more."

60. E. Singer, "Greener jet fuel," *Technology Review*, II June 2007.

61. D. Phillips. "Air Force -hopes to cut oil's role in fuel," *New York Times*, 18 June 2007.

62. Z. Serber, "Artemisinin and biofuel production n (paper presented at the Fourth Annual International Conference on Synthetic Biology, Hong Kong University of Science and Technology, 10-12 October 2008).

63. E. Seba, "Shell. Saudi commit to massive U.S. refinery project," Reuters, 21 September 2007.

64. See "BP, ABF and DuPont unveil $400 million investment in UK biofuels," www.bp.com/genericarticle.do ?categoryId= 2012968 &contentId=7034350 65.

65. S. Atsumi, T. Hanai, and J. C. Liao, *Non-fermentative pathways for synthesis of branched-chain higher alcohols as biofuels*, Nature 451, no. 7174 (2008.): 86-89.

66. R. Carlson, *Open-source biology and its impact on industry*, IEEE Spectrum (May 2001).

67· "Corn used as raw material for plastic bottle and fabric," *EngineerLive*, 1 October 2006, www.engineerlive.com/european-chemical-engineer/safety -in-the-plant/13234/ corn-used-as-raw-material-for-plastic-bottles-and-fabrics . thtml.

68. Y. H. P. Zhang, *High-yield hydrogen production from starch and water by a synthetic enzymatic pathway*, PLoS ONE, no. 5 (2007): e456.

69· For a more in-depth review, see J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2007).

70. W. B. Arthur, *The structure of invention*, Research Policy 36, no. 2 (2007): 274.

71. S. Berkun, *The Myths of Innovation* (Sebastopol, Calif.: O'Reilly, 2007).

72. Newcomb, Carlson, and Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures*.

(١٢) عن سترات المجانين المقيَّدة ومنصات القفز باعتبارها أفكارًا للابتكار

1.

إن تركيزي هنا على قانون الملكية الفكرية الأمريكي ليس مقصودًا به مطلقًا التقليل من أهمية القانون أو تطور التكنولوجيا في بلدان أخرى ولا من أهمية الاتفاقيات الدولية. وعلى المدى القصير، تكمن أهمية القانون الأمريكي في أن نصيب الأسد من عائدات الأنظمة المعدلة جينيًا موجودة في الوقت الراهن في الولايات المتحدة، كما جاء في الفصل الثاني، وسوف يستمر هذا الوضع لعدة سنوات قادمة. غير أنه من الأهمية بمكان أيضًا التركيز على قوانين الولايات المتحدة والسوابق القضائية لأن باقي العالم سوف لا يواجه في المستقبل عقبات اقتصادية أو تكنولوجية عند المنافسة المباشرة مع الولايات المتحدة في تطويره لتكنولوجيات بيولوجية جديدة وفي الحصول على المزايا الاقتصادية المترتبة على ذلك. وسواء كانت أنظمة الملكية الفكرية في الولايات المتحدة ترعى الابتكارات البيولوجية أو تعيقها فسوف يحدد ذلك إلى حد كبير القدرات المستقبلية للدولة في المنافسة على المسرح العالمي.

2. The U.S. Constitution is available online via the U.S. Government Printing Office, www.gpoaccess.gov/constitution/index.html.

3. See U.S. Patent and Trademark Office, "General information concerning patents," www.uspto.gov/go/pac/doc/general.

4. See "The United States Patent Office-sketch of its history," *New York Times*, 25 July 1859, http://query.nytimes.com/gst/abstract.html?res=9Do1EFDA1F 3IEE34BC4D51DFB1668382649FDE.

5. L. Lessig, *The Future of Ideas* (New York: Random House, 2001), 212, 259.

6. Ibid., 236.

7. M. W. McFarland, ed. *The Papers of Wilbur and Orville Wright, Including the Chanute- Wright Letters and Other Papers of Octave Chanute* (New York: McGraw-Hili, 1953), 17.

8. Ibid., 19.

9. See U.S. Centennial of Flight Commission, "Glenn Curtiss and the Wright patent battles," www.centennialofflight.gov/essay/Wright_Bros/Paten_Battles/ WR12.htm.

10. McFarland, *Papers of Wilbur and Orville Wright*, 982.

11. J. Clarke et al., *Patent Pools: A Solution to the Problem of Access in Biotechnology Patents?* (Washington D.C.: United States Patent and Trademark Office, 2000).

12. Ibid., 4.

13. R. Merges, *Institutions for Intellectual Property Transactions: The Case of Patent Pools* (1999). Preprint available at: www.berkeley.edu/institutes/belt/ pubs/merges.pdf

14. Ibid., 21.

15. M. A. Heller and R. S. Eisenberg, *Can patents deter innovations The anticommons in biomedical research*, Science 280, no. 5364 (1998): 698.

16. Merges, *Institutions for intellectual Property* Transactions.

17. J. Newcomb, R. Carlson, and S. Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures: implications for the U.S. Economy* (Cambridge, Mass.: Bio Economic Research Associates, 2007).

18. See U.S. Patent and Trademark Office, "USPTO issues white paper on patent pooling," 19 January 2001, www.uspto.gov/web/offices/com/speeches/.01-06.htm.

19. Clarke et al., *Patent Pools*, 6.

20. Merges, *Institutions for Intellectual Property Transactions*.

21. A. Rai and J. Boyle, *Synthetic biology: Caught between property rights, the public domain, and the commons*, PLoS Biology 5, no. 3 (2007): e58.

22. Ibid.

23. Newcomb, Carlson, and Aldrich, *Genome Synthesis and Design Futures*, 49.

24. A. Yancey and C. N. Stewart, *Are university researchers at risk for patent infringement?* Nat Biotech 25, no. II (2007): 1225.

25. R. Carlson, *Open-source biology and its impact on industry*, IEEE Spectrum (May 2001); R. Carlson, *The pace and proliferation of biological technologies, Biosecur Bioterror* I, no. 3 (2003): 203-214; R. Carlson, "Splice it yourself," *Wired*, May 2005.

26. J. Paradise, L. Andrews, and T. Holbrook, *Intellectual property: Patents on human genes: An analysis of scope and claims*, Science 307, no. 5715 (2005): 1566.

27. McFarland, *Papers of Wilbur and Orville Wright*, 989.

28. A. Davidson, "Big firms eye 'open innovation' for ideas," *Weekend Edition Sunday*, National Public Radio, 27 May 2007, www.npr.org/templates/story/ story.php?storyId=10480377.

29. R. Buderi, *What new economy?* Technology Review (January 2001): 45-50.

30. Y. Benkler, *The Wealth of Networks.* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 2006). 40. The Wealth of Networks is available online at www .benkler.org/wealth_of_networks/index.php/Main_Page.

31. See the IBM 2006 annual report. http://www.ibm.com/annualreport/2006/ cfs_earnings.shtml.

32. V. Vaitheeswaran, "The love-in." *Economist*, 11 October 2007.

33. Ibid.

34. H. Chesbrough, *Open Innovation: The New imperative for Creating and Profiting from Technology* (Cambridge, Mass.: Harvard Business School Press, 2003).

35. Ibid., xx.

36. Ibid., xxii.

37. Ibid., xxxiv.

38. Vaitheeswaran, "The love-in."

39. Chesbrough, *Open Innovation.*

40. Vairheeswaran, "The love-in."

41. Y. Benkler, *Coase's penguin, or. Linux and the nature of the firm*, Yale Law Journal 112., no. 3 (2002.): 371.

42. Ibid., 369.

43. S. Weber, *The Success of Open Source* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2004), 84.

44. Ibid., 9.

45. Ibid., l.

46 . J. Hope, Biobazaar: *The Open Source Revolution and Biotechnology* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2008).

47. See PageRank explained at www.google.com/technology.

48. S. Stokely, "Hardware vendors will follow the money to open source," *ITNews*, 31 January 2008. www.itnews.com.au/News/69229.hardware-vendors -will-follow-the-money-to-open-source.aspx.

49. See the Netcraft monthly Web Server Survey, http://news.netcraft.com/ archives/web_server_survey.html.

50. Vaitheeswaran, "The love-in."

51. R. A. Ghosh, *Economic Impact of Open Source Software on INNOVATION and the Competitiveness of the information and communication technologies (ICT) sector in the EU* (Brussels: European Commission, Directorate General for Enterprise and Industry, 2007).

52. See GNU Operating System, "The free software definition," www.gnu.org/ philosophy/free-sw.html.

53. See Wikipedia, "GNU General Public License" or "GPL," http://en.wikipedia . org/wiki/Gpl.

54. J. Buchanan, "Linus Tovalds talks future of Linux," *APC Magazine*, 22 August 2007.

55. B. Perens, "The emerging economic paradigm of open source," last edited, 16 Feb 2005: accessed, 12 Jan 2008, http://perens.com/Articles/Economic.html.

56. W. Baumol, *Small Firms*, from the original in U.S. Small Business Administration, Office of Advocacy, *The State of Small Business: A Report to the President* (Washington, D.C.: Government Printing. Office, 1994), 195.

57. Perens, "The emerging economic paradigm of open source."

58. Carlson, *Open-source biology and its impact on industry*.

(١٣) البيولوجيا مفتوحة المصادر أم البيولوجيا المفتوحة

1. See, "DARPA open-source biology letter," www.synthesis.cc/DARPA_OSB_Letter.html.

2. The Biobrick Foundation, "Our goals," as of 9 January 2008, www.biobricks.org.

3. Drew Endy, personal communication.

4. A. Rai and J. Boyle, *Synthetic biology: Caught between property rights, the public domain, and the commons*, PLoS Biology 5, no. 3 (2.007): e58.

5. S. Weber, *The Success of Open Source* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2004), 84.

6. "Open source biotech," *Red Herring*, April 2006.

7. See "BiOS license and tech support agreement version 1.5," www.bios.ret/daisy/bios/mta.

8. "Open source biotech," 32.

9. See, for example, "BiOS mutual non-assertion agreement, v2.0," www.bios.ret/daisy/bios/mta.

10. See "BiOS PMET license agreement," version 1.5, also called "The CAMBRIA biological open source (BiOS) license for plant enabling technologies," version 1.5, www.bios.ret/daisy/bios/mta.

11. See "What is the cost of a BiOS agreement?" at www.bios.net/daisy/bios/licenses/398/253 5html.

12. L. Lessig, *The Future of Ideas* (New York: Random House, 2.001), 236.

13. E. Raymond, *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary* (Cambridge, Mass.: O'Reilly Media, 2001). The text is online at .http://catb.orgl-esr/writings/cathedral-bazaar/ cathedral-bazaar.

14. J. Hope, *Biobazaar: The Open Source Revolution and Biotechnology* (Cambridge Mass.: Harvard University Press, 2008).

15. Ibid., 104.

16. J. Hope, "Open source biotechnology?" http://rsss.anu.edu.au/-janeth/OSBiotech.html.

17. Hope, *Biobazaar*, 139.

18. Hope, "Open source biotechnology?"

19. Ibid.

20. See S. Weber, *The Success of Open Source* (Cambridge, Mass.: Harvard Universit Press, 2008), 99.

21. Hope, *Biobazaar*, 139.

22. See J. Hope, "Open source biotechnology: A new way to manage scientific intellectual property," GeneWatch Magazine 18(1) 2005.

23. See Yahoo Finance, "Google Inc. (GOOG);" http://finance.yahoo.com/q/is?s=GOOG&annual.

24. S. Stokely, "Hardware vendors will follow the money to open source," *ITNews*, 3 January 2008, http://www.itnews.com.au/News/69229,hardware-vendors-will-follow-the-money-to-open-source.aspx (accessed 2 February 2008).

25. Hope, Biobazaar, 71.

26. Estimates from the FBI, Interpol, World Customs Organization, and the International Chamber of Commerce. See http://www.stopfakes.gov/sC\vhy.asp.

27. Ibid.

28. Hope, *Biobazaar*, 150.

29. D. Byrne, "David Byrne's survival strategies for emerging artists-and megastars, *Wired*, 18 December 2007.

30. Ibid.

31. David Byrne, in conversation with Brian Eno, "How the f-k can we get out of this? www.wired.com/entertainment/music/magazine/16-01/ff_byrne?current Page= z.

32. Byrne, "David Byrne's survival strategies."

33. See "Digital Millennium Copyright Act," http://en.wikipedia.org/wikiDigital_Miliennium_Copyright_Act (accessed 2.8 January 2008).

(١٤) ما الذي يصنع ثورة ؟

1. D. Bennett, "Envirournenrul defense," Boston Globe, 27 May 2007.

2. See the "Oil and the military" page from the Lugar Energy Initiative, http://lugar.senate.gov/energy/security/military.cfm.

3. On the DoD's rank in terms of fuel use, see Sohbet Karbuz, "US military oil pains, Energy Bulletin, 17 February 2007, http://www.energybulletin.net/ 26194.html.

4. W. Murray and M. Knox. "Thinking about Revolutions in Warfare." in M. Knox and W. Murray, eds., *The Dynamics of Military Revolutions*: 1300-2050 (Cambridge: Cambridge University Press, 2001).

5. M. Grimsley, "Surviving Military Revolutions: The U.S. Civil War," in M. Knox and W. Murray. eds., *The Dynamics of Military Revolution*: 1300-2050 (Cambridge: Cambridge University Press. 2001).

6. Murray and Knox, "Thinking about Revolutions in Warfare."

7. Ibid.

8. W. Murray and M. Knox. "The Future Is behind Us," in M. Knox and W. Murray. eds., *The Dynamics of Military Revolutions*: 1300-2050 (Cambridge: Cambridge University Press, 2001).

9. J. Cascio, "The lost hegemon (pt 2): The end of conventional war," Open the Future [blog], 7 May 2007. www.openthefuture.com/2007/05/the_lost -:hegemon_pt_2_the_end.html (accessed 2 January 2008).

10. J. W. Anderson, S. Fainaru, and J. Finer, "Bigger, stronger homemade bombs now to blame for half of U.S. deaths," *Washington Post*, 16 October 2005; C. Wilson. *Improvised Explosive Devices in Iraq: Effects and Countermeasures* (Washington D.C.: Congressional Research Service, Library of Congress. 2005).

11. M. Enserink, *The anthrax case: From spores to a suspect*, ScienceNOW, 12 August 2008.

12. On IEDs, see Anderson, "Bigger, stronger homemade bombs."

13. See, for example, DIY Drones, http://diydrones.com.

14. Chris Anderson, the editor of *Wired* magazine, posted an entry on the DIY Drones community blog titled "Can open source be giving comfort to the enemy?" at www.longtail.com/the_long_tail/2007/08/can-open-source.html. Anderson notes that he is "honestly conflicted" about misuse of the technology but is inclined to help anyone who asks, despite the community being "just a pen stroke away from being regulated out of existence, and in this climate it's politically unwise to discount the Homeland Security card ([his] own feelings about that notwithstanding)." Comments from other participants in the community are wholly supportive of sharing.

15. For list of tools, see Fab Central, http://fab.cba.mit.edu/content/tools; for quotation, see the Fab Lab wiki, http://fab.cba.mit.edu/about/about2.php.

16. See the Fab@Home main page, http://fabathome.org/wiki/index.php?title =Main_Page.

17. A. Anderson, "A whole new dimension," *Economist*: The World in 2008.2007.

18. See U. Hequist. "Open source 3D printer copies itself." *Computerworld*. 8 April 2008, http://computerworld.co.nz/news.nsf/tech/7E4C3C5D68A380ED CC257423006E71 CD. and RepRap. "What is RepRap?" www.reprap.org/bin/view/Main/WebHome.

19. V. Vairheeswaran. "A dark art no more," *Economist*, 11 Ocrober 2007.

20. Ibid.; "Revving up," *Economist*. 11. October 2007.

21. Peregrine Analytics. *Innovation and Small Business Performance. Examining the Relationship between Technological Innovation and the Within Industry Distributions*

of Fast Growth Firms (Washington, D.C.: U.S. Small Business Administration, 2006). 7.

22. Ibid.

23. On amounts spent on R&D, see PhRMA, wwwphrma.org/about_phrma; for quotation, see "Don't laugh at gilded butterflies," *Economist*, 22 April 2004.

24. G. Pisano, "Can science be a business? Lessons from Biotech," *Harvard Business Review*, 1 Ocrober 2006.

25. "Beyond the blockbuster," *Economist*, 28 July 2007.

26. Pisano, *Can science be a business?*, 115,119.

27. D. Edgerton, *The Shock of the Old: Technology and Global History Since 1900* (New York: Oxford University Press, 2007), xv.

28. Ibid., 79.

29. Ibid., 80.

30. Ibid.

31. Ibid., 77.

32. Ibid., chap. 4.

33. See "Security in ten years," Schneier on Security, 3 December 2007, www.schneier.com/blog/archives/2007/12/security_in_ten.html.

34. R. Carlson, *Open-source biology and its impact on industry*, IEEE Spectrum (May 2001).

35. K. Amanuma et al., *Transgenic zebrafish for detecting mutations caused by compounds in aquatic environments*, Nat Biotechnol 18, no. 1 (2000): 62-65; H. E. David et al., *Construction and evaluation of a transgenic hsp 16-GFP- lacZ* Caenorhabditis elegans *strain for environmental monitoring*, Environ Toxicol Chem 22, no. 1 (2003): 111-118; L. Nelson, "Plants to uncover landmines," *Nature News*, 29 January 2004.

36. See remarks of Senator Bill Frist at Harvard Medical School, 1 June 2005, www.synthesis.cc/2005/06/bill_frists_bio.html; see also R. Kurzweil and B. Joy, "Recipe for destruction," *New York Times*, 17 October 2005, www.nytimes.com/2005/10/17/opinion/17kurzweiljoy.html.

37. H. Pearson et al., SARS: *What have we learned?* Nature 424, no. 6945 (2003): 121-126.

خاتمة

1. See the iGEM 2008, http:2008.igem. org/Main_Page.

2. Michelle M. Becker, et al., *Synthetic recombinant bat SARS-like coronavirus is infectious in cultured cells and in mice*. PNAS 105, no. 50 (December 16, 2008): 19944-19949.

3. See the press release http:ucsusa.org/food_and_agriculture/science_and_impacts/science/failure-to-yield.html; and Doug Gurian-Sherman, *Failure to Yield: Evaluating*

the Performance of Genetically Engineered Crops (Cambridge, Mass.: UCS Publications, 2009).

4. See "BIO Debunks Myths in Anti-Industry Report: Agricultural Biotechnology Helps Farmers Increase Crop Production," www.bio.org/news/pressreleases/newsitem.asp?id= 2009_0414_01.

ملحق ببعض المصطلحات الواردة فى الكتاب وترجمتها

إعداد: المترجم

abstraction heirarchy	أفكار التسلسل الهرمى هى ابتكار بشرى يهدف إلى مساعدة من يرغبون فى هندسة أنظمة بالغة التعقيد بواسطة تجاهل التفاصيل غير المهمة.
automation	أتمتة
avionics	إلكترونيات الطيران
bacteriophage	البكتريوفاج (أو الفاج اختصارًا) هى نوع من الفيروسات لها القدرة على أحداث العدوى فى الجراثيم وقتلها. والكلمة معناها آكل الجراثيم. وقد استخدمت منذ أكثر من ٩٠ سنة بديلاً للمضادات الحيوية فى الاتحاد السوفيتى وأوربا الشرقية وفرنسا. وهى حاليًا شائعة الاستخدام فى الأبحاث الخاصة بالقضاء على الجراثيم.
bactoblood	الدم البكتيرى نظام لإنتاج الهيموجلوبين فى جرثومة الإيكولاى.
bashing DNA	العمليات الرئيسية التى يحتاجها نقل الدنا من كائن لآخر وتسمى أيضًا سحق الدنا.
Biobricks	لبنات البناء البيولوجية وهى قطع لها سمات خاصة تتيح إجراء تجميع تكرارى لتكوين "أجزاء مركبة" أطول مما يفضى إلى تكوين أنظمة أكبر.

Clean Genome E. coli	الإشكريشيا القولونية ذات الجينوم النظيف هى سلالة من الجرثومة تم فيها إلغاء الجينات الدخيلة التى لا تكرر فى جميع السلالات لتحديد جينوم أساسى أصغر.
combinatorial chemistry	الكيمياء التوافقية وهى التخليق السريع أو المحاكاة الكمبيوترية لعدد كبير من الجزيئات أو المواد المختلفة، ولكنها مقاربة فى تركيبتها. وهى تقنية ظهرت فى التسعينيات.
device physics	فيزياء الأداة أى الخواص الفيزيائية من حيث المادة والطاقة والتفاعلات بينهما.
electrophoretic separation	الفصل بالتحليل الكهربى.
electroporation	التثقيب الكهربى.
gene expression	تحويل المعلومات المشفرة فى الجينات إلى رنا الرسول ومن ثم إلى بروتينات
Global Positioning System (Gps)	نظام تحديد المواقع العالمى.
peer-to-peer data sharing	نظام "التشارك فى الملفات بين الأنداد" على الشبكة العنكبوتية سواء بتنزيلها (downi-oading) أو برفعها (uploading) بحيث يتمكن كل مستخدم من الدخول على كمبيوترات الآخرين وتنزيل ما يريده. ويقتصر استخدامها على الأغانى والأفلام، وهى خدمة مجانية واسعة الانتشار اليوم. سواء بتنزليها

	(upioading) أو برفعها (dronnioading) بحيث يتمكن كل مستخدم من الدخول على كمبيوترات الآخرين وتنزيل ما يريده. ويقتصر استخدامها على الأغانى والأفلام، وهى خدمة مجانية واسعة الانتشار اليوم.
Protenics	البروتيونية هى فرع من فروع التكنولوجيا البيولوجية يتناول تطبيق تقنيات البيولوجيا الجزيئية والكيمياء الحيوية وعلوم الوراثة لدراسة تركيب ووظائف وتفاعلات البروتينات التى تنتجها جينات خلية معينة أو نسيج معين أو كائن معين، مع تنظيم المعلومات فى قواعد بيانات وتطبيقات البيانات.
recombinant DNA	الدنا المؤتلف أو المعاد تجميعه من قطع صغيرة.
Registry of Standard Biological Parts	سجل القطع البيولوجية المعيارية.
reverse-genetics system	النظام الجينى المعكوس هو نسخ الدنا الخاص بجينات الفيروسات نسخًا معكوسًا إلى رنا فيروسى فى المختبر لتبسيط العمل على الفيروس.
Sanger sequencing	سلسلة سانجر هى أكثر وسائل السلسلة شيوعًا فى المعامل. وفيها تتحرك جزيئات الدنا ذات الأطوال المختلفة بسرعات مختلفة عندما تتعرض لمجال كهربى، وهى تقنية "الفصل بالتحليل الكهربى.
sickle cell anemia	فقر الدم المجلى.
software	برمجيات.

trhee-dimentional printers	الطابعات ثلاثية الأبعاد: ليست طابعات بالمعنى المتعارف عليه وإنما هى تكنولوجيا للتصنيع بالتجميع، وذلك بوضع طبقات متتالية فوق بعضها. وشاع استخدامها منذ سنة ٢٠٠٣ بعد انخفاض أسعارها. وهى تستخدم فى صناعة المجوهرات والأحذية والتصميمات الصناعية وصناعة النماذج الأولية.
X-ray crystallography	علم البللورات الإشعاعى وسيلة لتحديد ترتيب الذرات داخل بلورة، وفيه يضرب شعاع من أشعة إكس بلورة فيحدث حيود الشعاع أى انحراف إلى عدة اتجاهات محددة. ويستطيع الشخص المتخصص أن يخرج بصورة ثلاثية الأبعاد لكثافة الإلكترونات داخل البللورة. ومن تلك الصورة يمكن حساب مواقع الذرات داخل البللورة، ووالروابط الكيماوية التى تربط بين الذرات داخل الجزىء ، وكذلك الخلل الذى يصيب تلك الروابط.

المؤلف فى سطور :

روبرت هـ . كارلسون

يعمل مديرًا فى شركة بيوديزيك.

والمستشار العلمى لمركز (The Hastings).

وعضو المجلس الاستشارى لـ (Blue Marble Energy).

المترجم فى سطور :

أيمن توفيق

أستاذ بكلية الطب - جامعة الأزهر، ألَّف وترجم العديد من الكتب أهمها:

١- تاريخ الجراحة منذ أقدم العصور. (تأليف). إصدار الهيئة المصرية للكتاب ٢٠٠٩.

٢- شبح الملك ليوبولد. (مترجم). إصدار المركز القومى للترجمة ٢٠٠٩.

٣- رومانسية العلم. (مترجم). إصدار دار سطور الجديدة ٢٠٠٩، وصدر كذلك فى مكتبة الأسرة ٢٠١١.

٤- الأمراض المعدية وعلاجاتها. (مترجم). إصدار دار سطور الجديدة ٢٠١٠، وصدر كذلك فى مكتبة الأسرة ٢٠١١.

٥- تاريخ الأحداث الكبرى. (مترجم). إصدار المركز القومى للترجمة ٢٠١٠.

٦- العلم وأزمنته. المجلد الأول. (مترجم). إصدار المركز القومى للترجمة. تحت الطبع .

Aymantl @yahoo. com

المراجع فى سطور:

محمود خيال

أستاذ غير متفرغ بكلية الطب جامعة الأزهر - قسم الأدوية (الفارماكولوجى).

عضو مجلس إدارة الاتحاد الدولى للفارماكولوجيا الإكلينيكية، وعضو لجنة الثقافة العلمية بالمجلس الأعلى للثقافة، وعضو لجنة الترجمة العلمية بالمركز القومى للترجمة.

وسبقت له ترجمة كتابى «الإسلام والعلم» و «صخور الزمان» إلى جانب عدد آخر من كتب تبسيط العلوم ومقالاتها.

التصحيح اللغوى: وجـــيه فـــاروق
الإشـراف الفنى: حســـن كامـــل